MECANICĂ
TEORETICĂ
ȘI APLICATĂ

I. N. Constantinescu • T. Tacu

Calcule de rezistență pentru utilaje tehnologice

Scanned with OKEN Scanner

Ioan N. Constantinescu

Tudor Tacu

Calcule de rezistență pentru utilaje tehnologice

Structuri izotrope, axial simetrice

Editura tehnică
București—1979

Scanned with OKEN Scanner

Redactor: NATALIA FIUCIUC
Tehnoredactor: ELLY GORUN
Coperta seriei: ALEXANDRU BANU

Bun de tipar: 10.05.1979; Coli de tipar: 18,25
Tiraj: 3550+85 exemplare broșate; C.Z: 621:620.10

c. 2 — I.P. Informația
str. Brezoianu 23—25
București

Scanned with OKEN Scanner

Cuprins

Pag.

Notații 5

Capitolul I. **Generalități** 7

Capitolul II. **Relațiile de calcul pentru elementele componente ale structurilor** 12
2.1. Placa plană circulară 12
2.2. Placa plană inelară 20
2.3. Învelișul cilindric lung 28
2.4. Învelișul cilindric scurt 34
2.5. Învelișul conic. 47
2.6. Învelișul sferic cu două margini 66
2.7. Învelișul sferic cu o margine 81

Capitolul III. **Algoritmul de rezolvare a structurilor izotrope, axial simetrice** . . 83
3.1. Transformarea relațiilor de calcul 83
3.2. Scrierea condițiilor de continuitate 86
3.3. Calculul tensiunilor 110

Capitolul IV. **Elementele limbajului STAXIS** 117
4.1. Descrierea generală a limbajului 117
4.2. Instrucțiunile de comandă 118
4.3. Instrucțiunile de descriere a structurii 120
4.4. Instrucțiunile de definire a valorilor parametrilor 123
4.5. Instrucțiunile pentru calculul tensiunilor și ale modului de afișare a rezultatelor 125

Capitolul V. **Descrierea programului STAXIS** 130
5.1. Structura generală a programului 130
5.2. Subprogramul de împachetare 137
5.3. Subprogramul de analiză a instrucțiunilor de comandă 145
5.4. Subprogramul de analiză a descrierii structurii. 154
5.5. Subprogramul de citire a parametrilor 165
5.6. Subprogramul de analiză a instrucțiunilor de afișare 171
5.7. Subprogramele specifice tipurilor de elemente. Alte subprograme 175
5.8. Programul principal 180

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul VI. **Utilizarea programului** 185
6.1. Tipuri de probleme ce pot fi rezolvate cu programul STAXIS . . 185
6.2. Limitări și restricții la utilizarea programului 187
6.3. Mesaje de eroare 189
6.4. Precizia rezultatelor ce se obțin cu programul STAXIS 194
6.5. Verificări ale programului 195
6.6. Utilizarea programului pe calculatorul IBM 1130. 203
6.7. Utilizarea programului pe calculatorul FELIX C—256 203

Capitolul VII. **Calculul de rezistență al principalelor tipuri de utilaje tehnologice** 209
7.1. Generalități 209
7.2. Calculul recipientelor sub presiune 212
7.3. Calculul utilajelor încălzite neuniform 231
7.4. Calculul rotoarelor și discurilor aflate în mișcare de rotație . . . 258
7.5. Calculul unor utilaje axial nesimetrice 278
7.6. Determinarea geometriei optime a structurilor 285
7.7. Utilizarea în proiectare a programului STAXIS 289

Bibliografie 291

Notații

$a_0, a_1 \ldots, a_4$ — coeficienți ai termenilor funcției T, de variație a temperaturii pe generatoare

$b_0, b_1, \ldots, b_4$ — coeficienți ai termenilor funcției ΔT, de variație a temperaturii pe grosime

c_p, c_ω, c_x — coeficienți ai sarcinii axiale și radiale pentru învelișurile cilindrice

d_0, $d_1, \ldots, d_7$ — funcții utilizate pentru învelișurile sferice

$e_1, e_2, \ldots, e_8$ — funcții utilizate pentru placa inelară

e_{10}, $e_{11} \ldots, e_{17}$ — funcții utilizate pentru învelișurile sferice

f, f_1, f_2 — sarcini distribuite, produse de forțele de inerție centrifuge

g — accelerația gravitației

h — grosimea învelișurilor

m_0, m_1, m_2 — parametri ai învelișurilor

p — presiunea

p_n, p_t — componentele sarcinii distribuite, pe normala, respectiv pe tangenta la înveliș

r — raza circumferinței mici pentru placa inelară și învelișul conic

s — variabilă, pentru învelișul conic

u, v, w — componentele deplasării după direcțiile de coordonate

u_1, u_2, ..., u_6 — funcții utilizate pentru placa inelară

x, y, z — coordonate carteziene

x, φ, R — coordonate cilindrice

x_{12}, x_{22}, x_{13}, x_{23}

y_{12}, y_{22}, y_{13} y_{23} — funcții utilizate pentru învelișul conic

$z_1, z_2, \ldots, z_{18}$ — funcții utilizate pentru învelișurile conic și sferic

A_{ij} — coeficienți ai termenilor sistemului de ecuații obținut prin scrierea condițiilor de continuitate

B_i — termeni liberi ai sistemului de ecuații obținut prin scrierea condițiilor de continuitate

C_i — constante de integrare

D — rigiditatea la încovoiere

E — modulul de elasticitate longitudinal

F — funcție utilizată pentru plăcile plane

F_0 — funcție utilizată pentru învelișul conic

F_1, F_2	prima, respectiv a doua funcție a sarcinilor pentru învelișurile conic și sferic
H	grosimea plăcilor plane
L	lungimea învelișurilor scurte : cilindric și conic
L_1, L_2	operatori diferențiali
$M_r, M_R, M_x, M_\varphi, M_\psi$	intensitățile momentelor încovoietoare
$N_r, N_R, N_x, N_\varphi, N_\psi$	intensitățile eforturilor de întindere
P	rezultanta sarcinii axiale (exterioare)
Q	intensitatea forței tăietoare
R	raza suprafeței mediane a învelișului cilindric și raza circumferinței mari pentru placa inelară și învelișul conic
S	intensitatea efortului radial (pentru învelișurile conic și sferic)
T	funcția variației temperaturii pe generatoare
$T_0, T_1 \ldots, T_7$	funcții utilizate pentru plăcile plane și pentru învelișurile cilindrice
V	funcțiile Rayleigh
$U_{01}, U_{02}, U_{03}, U_{04}$	funcții utilizate pentru învelișul cilindric scurt
$U_1, U_2 \ldots, U_{19}$	funcție utilizată pentru învelișul conic
V	funcțiile Krîlov
V_1, V_2, V_3, V_4	funcții utilizate pentru învelișurile conic și
$X_1, X_2, \ldots, X_{18}$	sferic
$Y_1, Y_2, \ldots, Y_{18}$	mărime adimensională
$\overline{X}$	valoare particulară (referitoare la o mărime, funcție, soluție etc.)
X^*	coeficientul de dilatare termică liniară
α	coeficient adimensional, pentru placa plană inelară și învelișul conic
$\beta = R/r$	greutatea volumică a materialului
γ	coeficient de rang al unui element al structurii
δ	alungire specifică
ε	funcție a sarcinii axiale, utilizată pentru învelișurile cilindrice
ζ	variabilă adimensională, pentru plăcile plane
η	rotirea normalei la suprafața mediană
θ	lungimea adimensională a învelișului cilindric scurt
λ	coeficientul de contracție transversală
μ	variabilă adimensională, pentru învelișul conic
ν	variabilă adimensională, pentru învelișurile cilindric și conic
ξ	coordonate cilindrice
ρ, l, z	tensiuni principale
$\sigma_x, \sigma_\rho, \sigma_t, \sigma_\varphi, \sigma_\psi$	unghiul generatoarei învelișului conic cu planul normal pe axă
φ	unghiurile la centru corespunzătoare marginilor învelișurilor sferice
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_m$	coordonate sferice
φ, ψ, R	funcții utilizate pentru învelișul cilindric scurt
$\chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_{11}$	viteză unghiulară
ω	deplasare radială, pe conturul interior, respectiv exterior pentru plăcile plane
$\Delta r, \Delta R$	funcția variației temperaturii pe grosime
ΔT	funcții utilizate pentru plăcile plane
$\Phi_0, \Phi_1, \Phi_2,$	coeficient de orientare al unui înveliș
Ω	

Scanned with OKEN Scanner

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul I

Generalități

Utilajele și instalațiile tehnologice conțin o mare varietate tipo-dimensională de subansamble formate din plăci plane și curbe. Este cazul recipientelor sub presiune, reactoarelor chimice, cazanelor, schimbătoarelor de căldură, carcaselor, rotoarelor etc.

Prima etapă în abordarea studiului de rezistență al unor astfel de subansamble este elaborarea *schemei de calcul* a obiectului respectiv. În cele ce urmează, se va utiliza, pentru ansamblul ce rezultă ca urmare a schematizării, termenul general de *structură*.

Determinante pentru modul în care se face calculul de rezistență al structurilor formate din plăci plane și curbe, precum și alegerea materialului și stabilirea tehnologiei de execuție sînt presiunea și temperatura de lucru. Pentru presiuni mici calculul se poate face în teoria de membrană, iar pentru presiuni mari în teoria de încovoiere a plăcilor subțiri sau chiar în teoria de perete gros.

Dacă temperaturile de lucru sînt mari, este necesar să se ia în considerare modificarea caracteristicilor mecanice ale materialelor cu temperatura sau chiar să fie necesară considerarea fenomenului de fluaj.

Marea diversitate a condițiilor în care lucrează aceste structuri duce deseori la necesitatea efectuării calculului la vibrații și șoc precum și a calculului de rezistență la solicitări variabile.

Prezența nervurilor și a elementelor de consolidare în zonele de rezemare — de exemplu — poate duce la necesitatea considerării în calcul a unei structuri anizotrope, cu ortotropie constructivă [4].

Deoarece deteriorarea în serviciu a recipientelor sub presiune, schimbătoarelor de căldură, reactoarelor etc., poate provoca de cele mai multe ori accidente grave, exigenţele cerute la proiectarea, execuţia şi utilizarea acestor ansambluri sînt deosebite. O serie de norme şi recomandări oficiale [51], [52] reglementează modul de calcul şi dau indicaţii privind proiectarea, alegerea materialelor, tehnologia de execuţie etc. pentru diverse categorii de utilaje.

De asemenea, larga utilizare a acestor structuri în numeroase industrii, face ca orice îmbunătăţire a metodelor de calcul şi proiectare, în vederea raţionalizării consumului de material şi de manoperă, precum şi a măririi siguranţei în exploatare, să aibă efecte economice considerabile.

Lucrarea de faţă îşi propune să aducă o contribuţie în domeniul calculului stărilor de tensiune din structurile axial simetrice formate din plăci plane şi curbe subţiri, solicitate static la încovoiere, în regim elastic.

Stările de tensiune determinate pentru solicitarea compusă de întindere şi încovoiere, oferă o imagine din care se pot deduce zonele structurii în care sînt tensiuni locale mari, pe baza studiului acestor valori putîndu-se modifica geometria structurii în vederea optimizării ei.

Algoritmul şi limbajul de programare elaborate permit persoanelor interesate, într-un mod simplu şi eficient, să folosească calculatoarele electronice pentru determinarea completă a stării de tensiune dintr-o structură proiectată sau să stabilească geometria optimă a acesteia, din punctul de vedere al valorilor tensiunilor.

Simplitatea şi elasticitatea limbajului fac posibilă utilizarea lui de către persoane care nu au cunoştinţe de programare, efortul necesar pentru aceasta fiind minim. Programul are încorporat un mare număr de verificări ale datelor de intrare şi rezultatelor, verificări ce se efectuează în diverse etape ale execuţiei, prin aceasta reducîndu-se la minimum riscul unei utilizări incorecte şi a obţinerii unor rezultate eronate. Mesajele transmise în cazul existenţei unor erori permit depistarea comodă a acestora.

Ipotezele care au delimitat cadrul formulării problemei şi al desfăşurării calculelor, au fost cele care stau la baza teoriei liniare a plăcilor subţiri elastice şi anume [27], [28], [38]:

— deplasările sînt mici în comparaţie cu dimensiunile structurii;

— grosimile sînt mici în comparaţie cu celelalte dimensiuni;

Scanned with OKEN Scanner

— ipoteza Love-Kirchhoff a elementului normal indeformabil;
— forţele şi momentele de suprafaţă şi de margine acţionează direct asupra suprafeţei mediane;
— liniaritate fizică (de material).

Consecinţele ce decurg din acceptarea acestor ipoteze, sînt determinante pentru modul în care s-a desfăşurat calculul. Cele mai importante sînt:

— ecuaţiile de echilibru scrise pentru sistemul nedeformat rămîn valabile şi pentru sistemul deformat;
— condiţiile la limită şi de continuitate se scriu pentru suprafeţele mediane ale elementelor;
— aplicabilitatea principiului suprapunerii efectelor;
— tensiunile normale produse de solicitarea de întindere sînt constante pe grosimea plăcii, iar cele datorite încovoierii au variaţie liniară.

Abordarea problemei calculului stărilor de tensiune din structuri de forme oricît de generale, încărcate cu orice fel de sarcini este posibilă prin folosirea metodei elementelor finite, a metodei relaxării sau a diferenţelor finite [2], [7], [37], [50]. Aceste metode se pretează bine pentru utilizarea pe calculatoare electronice, dar necesită un mare volum de date de intrare, programele obţinute fiind foarte mari. Elaborarea acestor programe necesită un volum considerabil de muncă, care creşte foarte mult, cu cît problema se abordează într-un caz mai general, ele fiind greu de utilizat de persoane care nu au cunoştinţe temeinice de programare.

Pe de altă parte, astfel de programe nu se pot rula decît pe sisteme de calcul ultrarapide, avînd memorii operative de mari dimensiuni. Chiar şi în astfel de condiţii, pentru structuri de complexitate medie, timpul de calcul este considerabil.

În lucrarea de faţă s-a restrîns generalitatea problemei, ceea ce a permis elaborarea unui algoritm care să ducă la rezolvarea directă a temei propuse, programul corespunzător fiind relativ simplu, cu un volum restrîns, necesitînd puţine date de intrare. Manipularea programului, în aceste condiţii, este foarte simplă.

În consecinţă, problema tratată în cele ce urmează este definită de următoarele restricţii:

1°. Structura este izotropă şi axial simetrică. Prin aceasta se înţelege simetria axială atît a geometriei structurii, a proprietăţilor materialului precum şi a sarcinilor [35], [49]. Structura are o axă longitudinală în lungul căreia pot avea loc variaţii ale mărimilor de intrare sau de ieşire. În lungul circumferinţelor obţinute prin intersecţii ale structurii cu plane normale pe axa sa, nu au loc nici un fel de

variații ale parametrilor geometrici, sarcinilor sau constantelor de material și în consecință nici ale tensiunilor. În orice punct al structurii tensiunile principale au direcțiile longitudinală, circumferențială și radială.

2°. Structura este formată dintr-un număr oarecare de elemente simple, plăci plane și curbe subțiri.

Tipurile elementelor considerate sînt următoarele :

— placă plană circulară ;
— placă plană inelară ;
— înveliș cilindric scurt ;
— înveliș cilindric lung ;
— înveliș conic ;
— înveliș sferic cu două margini ;
— înveliș sferic cu o margine (calotă sferică închisă la vîrf).

Desigur că se poate ivi necesitatea completării și cu alte tipuri de elemente cum ar fi învelișul toroidal [12], [39], eliptic, paraboloidal etc.

Algoritmul și programul au fost elaborate așa fel încît se pot încorpora cu ușurință și alte tipuri de elemente, după necesități.

3°. Pentru structura în ansamblu, s-a considerat un sistem staționar de sarcini care la nivelul fiecărui element are :

— presiune interioară (sau exterioară) uniformă ;
— forță axială (suplimentară față de cea datorită presiunii uniforme) ;
— forțe centrifuge radiale, ca urmare a rotirii structurii cu viteză unghiulară constantă în jurul axei ;
— variație a temperaturii în lungul generatoarei ;
— variație liniară a temperaturii pe grosimea peretelui fiecărui element.

4°. Parametrii geometrici și de material sînt constanți pentru un același element dar pot fi diferiți de la un element la altul. În consecință, descompunînd structura ce se studiază într-un număr convenabil de elemente se pot trata și structuri care au :

— perete cu grosime variabilă ;
— presiune variabilă longitudinal ;
— caracteristici de material variabile în lungul axei, ca urmare a unei variații mari de temperatură.

5°. Structura este static determinată în lungul axei longitudinale. Aceasta înseamnă de fapt că în fiecare element al structurii se pot determina eforturile axiale prin efectuarea unei secțiuni cu un plan normal pe axă și scrierea unei ecuații de echilibru adecvate.

Scanned with OKEN Scanner

Principalele etape ale rezolvării structurii izotrope, axial simetrice sînt :

— descompunerea structurii în elemente simple convenabil determinate ;

— scrierea condiţiilor de continuitate ale deplasărilor şi de echilibru ale eforturilor de legătură, pe contururile de îmbinare ale elementelor ;

— calculul constantelor de integrare care intervin în expresiile analitice ale deplasărilor, eforturilor şi tensiunilor fiecărui element al structurii ;

— calculul tensiunilor.

În afara primei etape, care este efectuată exclusiv de utilizator, toate celelalte le efectuează calculatorul, aşa cum se arată în cadrul capitolelor 4 şi 5. În esenţă, utilizatorul trebuie să descrie structura, folosind limbajul elaborat în acest scop (pentru calculul STructurilor AXIal Simetrice denumit STAXIS), să introducă datele referitoare la geometria structurii, constantele de material şi sarcini şi să facă opţiuni privind forma datelor de intrare şi ieşire.

Scanned with OKEN Scanner

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul II

Relaţiile de calcul pentru elementele componente ale structurilor

În vederea scrierii condiţiilor de continuitate a deplasărilor şi de echilibru ale eforturilor de legătură pe contururile de îmbinare ale elementelor componente ale structurii, este necesar să se cunoască pe aceste contururi, pentru fiecare element component, expresiile analitice ale deplasărilor radiale, rotirilor, momentelor încovoietoare axiale şi forţelor radiale.

De asemenea trebuie determinate expresiile tensiunilor principale într-o secţiune oarecare a elementului considerat.

În cele ce urmează se dau aceste expresii pentru elementele şi sarcinile enumerate în capitolul 1.

Pentru claritatea expunerii, calculele se prezintă separat pentru fiecare solicitare simplă, sau pentru grupe de solicitări. Prin suprapunerea efectelor astfel considerate, se vor obţine expresiile finale utilizabile pentru calculul numeric. Aceste expresii se prezintă în capitolul 3.

2.1. Placa plană circulară

2.1.1. *Încovoierea datorită presiunii uniforme* [8], [40]

Cu notaţiile din figura 2.1, pentru placa plană circulară, simplu rezemată pe contur, încărcată cu presiunea uniformă p, expresia

rotirii normalei pe conturul plăcii este :

$$\theta(1) = \frac{3}{2}(1-\mu)\frac{pR^3}{EH^3} \tag{2.1}$$

în care μ este coeficientul de contracţie transversală, E modulul de elasticitate longitudinal.

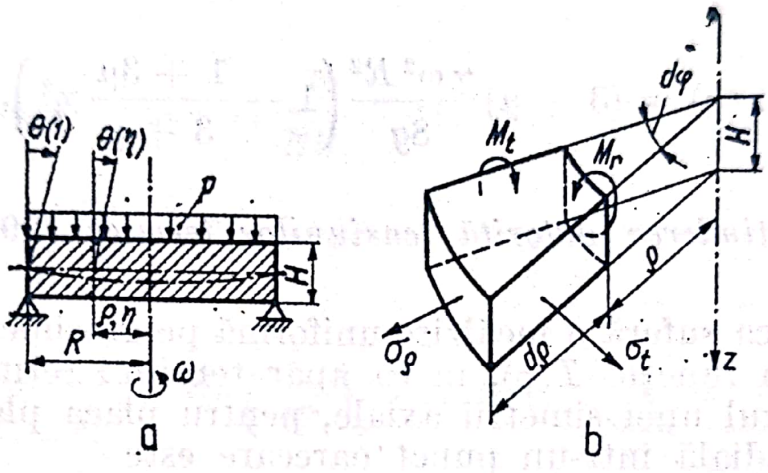


Fig. 2.1.

Momentele încovoietoare, radial şi circumferenţial, într-un punct oarecare al plăcii, sînt respectiv :

$$M_\rho(\eta) = (3+\mu)\frac{pR^2}{16}(1-\eta^2) \tag{2.2}$$

$$M_t(\eta) = (3+\mu)\frac{pR^2}{16}\left(1-\frac{1+3\mu}{3+\mu}\eta^2\right), \tag{2.3}$$

în care

$$\eta = \frac{\rho}{R} \tag{2.4}$$

este abscisa adimensională a plăcii.

2.1.2. *Întinderea datorită mişcării de rotaţie* [26]

În cazul unei mişcări de rotaţie a plăcii în jurul axei sale cu viteza unghiulară constantă ω, apare o solicitare de întindere a plăcii în planul său. Deplasarea radială pe contur este

$$\Delta R = (1-\mu)\frac{\gamma\omega^2 R^3}{4g\,E} \tag{2.5}$$

Scanned with OKEN Scanner

în care γ este greutatea volumică a materialului plăcii, g accelerația gravitației.

Tensiunile principale într-un punct oarecare al plăcii sînt:

$$\sigma_\rho(\eta) = (3+\mu)\frac{\gamma\omega^2 R^2}{8g}(1-\eta^2) \tag{2.6}$$

$$\sigma_t(\eta) = (3+\mu)\frac{\gamma\omega^2 R^2}{8g}\left(1-\frac{1+3\mu}{3+\mu}\eta^2\right). \tag{2.7}$$

2.1.3. *Întinderea datorită tensiunilor termice* [29],[32]

Dacă placa suferă o încălzire uniformă pe grosime dar variabilă radial după o funcție $T(\rho)$, în ea apar tensiuni termice de membrană. În cazul unei simetrii axiale, pentru placa plană circulară, deplasarea radială într-un punct oarecare este

$$u(\rho) = \frac{(1+\mu)\alpha}{\rho}\int_0^\rho T(\rho)\,\rho\,d\rho + C_1\rho \tag{2.8}$$

în care α este coeficientul de dilatare termică liniară, C_1 constanta de integrare.

Tensiunile într-un punct al plăcii sînt

$$\sigma_\rho(\rho) = -\frac{E\alpha}{\rho^2}\int_0^\rho T(\rho)\rho\,d\rho + \frac{EC_1}{1-\mu} \tag{2.9'}$$

$$\sigma_t(\rho) = \frac{E\alpha}{\rho^2}\int_0^\rho T(\rho)\rho\,d\rho - E\alpha T(\rho) + \frac{EC_1}{1-\mu}. \tag{2.10'}$$

Pentru determinarea constantei de integrare C_1 se va scrie o condiție pe conturul plăcii. Se consideră că pe contur acționează efortul radial $N_R(1)$, ca în figura 2.2. Atunci

$$\sigma_\rho(R) = \frac{N_R(1)}{H}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Înlocuind această valoare în relaţia (2.9′) se obţine constanta de integrare

$$C_1 = \frac{1-\mu}{E}\left[\frac{N_R(1)}{H} + \frac{E\alpha}{R^2}\int_0^R T(\rho)\rho d\rho\right]$$

cu care, din expresiile (2.8), (2.9′) şi (2.10′) rezultă :

$$\Delta R = u(R) = (1-\mu)\frac{R}{EH}N_R(1) + \frac{2\alpha}{R}\int_0^R T(\rho)\rho d\rho \qquad (2.11')$$

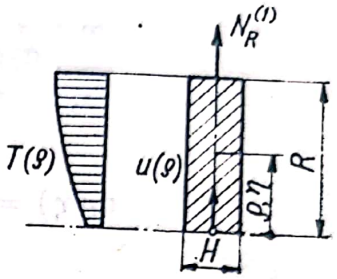


Fig. 2.2.

$$\sigma_\rho(\rho) = \frac{N_R^{(1)}}{H} + E\alpha\left[\frac{1}{R^2}\int_0^R T(\rho)\rho d\rho - \frac{1}{\rho^2}\int_0^\rho T(\rho)\rho d\rho\right] \qquad (2.9'')$$

$$\sigma_t(\rho) = \frac{N_R^{(1)}}{H} + E\alpha\left[\frac{1}{R^2}\int_0^R T(\rho)\rho d\rho + \frac{1}{\rho^2}\int_0^\rho T(\rho)\rho d\rho - T(\rho)\right]. \qquad (2.10'')$$

Dacă funcţia de temperatură se consideră

$$T(\rho) = \sum_{n=0}^{3} a_n \rho^n \qquad (2.12)$$

se obţine

$$\int_0^\rho T(\rho)\rho d\rho = \int_0^n T(\eta)\eta R^2 d\eta = R^2 T_0(\eta) \qquad (2.13')$$

în care s-au notat

$$T(\eta) = \sum_{n=0}^{3} \bar{a}_n \eta^n \qquad (2.13'')$$

$$\bar{a}_n = a_n R^n \quad \text{pentru} \quad n = 0, 1, 2, 3, \quad \text{şi} \qquad (2.13''')$$

$$T_0(\eta) = \sum_{n=0}^{3} \frac{\bar{a}_n}{n+2}\eta^{n+2}. \qquad (2.13^{IV})$$

Înlocuind expresiile (2.12), (2.13) în relaţiile (2.11′), (2.9″) şi (2.10″) se obţin, în final

$$\Delta R = (1-\mu)\frac{R}{EH}N_R^{(1)} + 2\alpha R T_0(1) \tag{2.11}$$

$$\sigma_\rho(\eta) = \frac{N_R^{(1)}}{H} + E\alpha\left[T_0(1) - \frac{1}{\eta^2}T_0(\eta)\right] \tag{2.9}$$

$$\sigma_t(\eta) = \frac{N_R^{(1)}}{H} + E\alpha\left[T_0(1) + \frac{1}{\eta^2}T_0(\eta) - T(\eta)\right]. \tag{2.10}$$

2.1.4. *Încovoierea datorită tensiunilor termice* [32]

Dacă placa suferă o încălzire cu un cîmp staţionar de temperatură, axial simetric, cu o variaţie oarecare pe grosime şi pe rază, atunci în ea se va produce o solicitare compusă de întindere şi încovoiere. Efectul variaţiei de temperatură în lungul razei a fost considerat la punctul 2.1.3, aşa fel încît se va admite numai existenţa unei variaţii de temperatură pe grosimea plăcii, care produce tensiuni termice de încovoiere.

Avînd în vedere că placa este considerată subţire, se face ipoteza că temperatura variază liniar pe grosimea acesteia. Dacă $\Delta T(\rho)$ este diferenţa de temperatură între două puncte situate pe suprafeţele laterale ale plăcii, la distanţa ρ faţă de centru, atunci într-un punct situat la distanţa z faţă de suprafaţa mediană, temperatura va fi

$$T(\rho,z) = -\frac{z}{H}\Delta T(\rho). \tag{2.14}$$

În aceste condiţii, ecuaţia diferenţială a plăcii, scrisă în deplasări este

$$\nabla^4 w = \frac{1+\mu}{H}\nabla^2(\alpha\Delta T) \tag{2.15}$$

în care

$$\nabla^2 = \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}\rho^2}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Momentele încovoietoare sînt

$$M_\rho(\rho) = -D\left(\frac{\mathrm{d}^2 w}{\mathrm{d}\rho^2} + \frac{\mu}{\rho}\cdot\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}\rho}\right) + \frac{E\alpha H^2 \Delta T}{12\,(1-\mu)}$$

$$M_t(\rho) = -D\left(\frac{1}{\rho}\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}\rho} + \mu\frac{\mathrm{d}^2 w}{\mathrm{d}\rho^2}\right) + \frac{E\alpha H^2 \Delta T}{12\,(1-\mu)} \qquad (2.16)$$

în care

$$D = \frac{EH^3}{12\,(1-\mu^2)} \qquad (2.17)$$

este rigiditatea la încovoiere a plăcii.

Momentele încovoietoare (2.16) sînt pozitive cînd fibrele superioare ale plăcii sînt comprimate şi temperatura suprafeţei superioare este mai mare ca a suprafeţei inferioare. Dacă se consideră că pe conturul plăcii acţionează momentul încovoietor $M_R(1)$, sensurile pozitive ale mărimilor care intervin sînt reprezentate în figura 2.3.

Pentru placa circulară, soluţia ecuaţiei diferenţiale (2.15) este

$$w(\rho) = \frac{1+\mu}{H}\left[\int_0^\rho \frac{F(\rho)}{\rho}\,\mathrm{d}\rho + C_1 + C_3\rho^2\right], \qquad (2.18)$$

în care

$$F(\rho) = \int_0^\rho \alpha\Delta T(\rho)\rho\,\mathrm{d}\rho \qquad (2.19)$$

şi C_1 şi C_3 sînt constante de integrare.

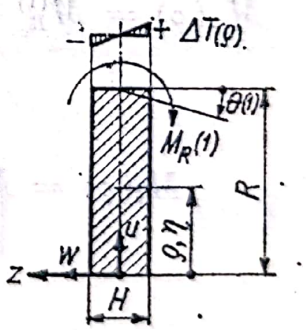


Fig. 2.3

Observaţie. În forma generală, expresia (2.18) are patru constante de integrare, două dintre acestea trebuind să fie nule pentru placa circulară, pentru a nu avea singularităţi în centrul plăcii.

Dacă se notează

$$\Phi_1(\rho) = \int_0^\rho \frac{F(\rho)}{\rho}\,\mathrm{d}\rho \qquad (2.20)$$

și se înlocuiește succesiv în (2.18) și în prima din relațiile (2.16), se obține

$$M_\rho(\rho) = -\frac{EH^2}{12\,(1-\mu)}\left[-\alpha\Delta T(\rho) + \frac{\mathrm{d}^2\Phi_1}{\mathrm{d}\rho^2} + \frac{\mu}{\rho}\,\frac{\mathrm{d}\Phi_1}{\mathrm{d}\rho} + 2(1+\mu)\,C_3\right]$$

cu ajutorul căreia se determină constanta de integrare C_3, scriind că pe conturul plăcii momentul încovoietor radial are valoarea $M_R^{(1)}$.

Rezultă

$$C_3 = \frac{1}{2\,(1+\mu)}\left[\alpha\Delta T(R) - \frac{12\,(1-\mu)}{EH^2}\,M_R^{(1)} - \Phi_2(R)\right] \tag{2.21}$$

în care s-a notat

$$\Phi_2(\rho) = \frac{\mathrm{d}^2\Phi_1}{\mathrm{d}\rho^2} + \frac{\mu}{\rho}\cdot\frac{\mathrm{d}\Phi_1}{\mathrm{d}\rho}. \tag{2.22}$$

Înlocuind (2.21) în relațiile (2.16) și ținînd seama de notațiile (2.22) și (2.20) se obțin expresiile momentelor încovoietoare sub forma

$$M_\rho(\rho) = M_R^{(1)} + \frac{EH^2}{12(1-\mu)}\{\Phi_2(R) - \Phi_2(\rho) + \alpha[\Delta T(\rho) - \Delta T(R)]\} \tag{2.23'}$$

$$M_t(\rho) = M_R^{(1)} + \frac{EH^2}{12\,(1-\mu)}\left\{\Phi_2(R) - \mu\,\frac{\mathrm{d}^2\Phi_1}{\mathrm{d}\rho^2} - \frac{1}{\rho}\,\frac{\mathrm{d}\Phi_1}{\mathrm{d}\rho} + \right.$$
$$\left. + \alpha[\Delta T(\rho) - \Delta T(R)]\right\}.$$

Rotirea plăcii pe contur este

$$\theta(R) = -\left(\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}\rho}\right)_{\rho=R} = -\frac{1+\mu}{H}\left(\frac{\mathrm{d}\Phi_1}{\mathrm{d}\rho}\right)_{\rho=R} + \tag{2.24'}$$
$$+\frac{R}{H}\left[\frac{12\,(1-\mu)}{EH^2}\,M_R^{(1)} - \alpha\Delta T(R) + \Phi_2(R)\right].$$

Scanned with OKEN Scanner

Dacă funcţia de temperatură se consideră

$$\Delta T(\rho) = \sum_{n=0}^{3} b_n \rho^n \tag{2.25}$$

se obţine, avînd în vedere relaţia (2.19),

$$F(\rho) = \alpha R^2 \eta^2 T_2(\eta) \tag{2.26}$$

în care s-au notat

$$T_2(\eta) = \sum_{n=0}^{3} \frac{\bar{b}n}{n+2} \eta^n, \quad T_3(\eta) = \Delta T(\eta) - T_2(\eta) \tag{2.27}$$

$$\bar{b}_n = b_n R^n \quad \text{pentru} \quad n = 0,1,2,3 \tag{2.28}$$

şi

$$\Delta T(\eta) = \sum_{n=0}^{3} \bar{b}_n \eta^n. \tag{2.29}$$

Calculînd în aceste condiţii expresiile (2.20) şi (2.22), prin înlocuiri în (2.24′) şi (2.23′) rezultă rotirea pe contur :

$$\theta(1) = 2\frac{R}{H}\left[6(1-\mu)\frac{M_R^{(1)}}{EH^2} - \alpha T_2(1)\right] \tag{2.24}$$

şi momentele încovoietoare

$$M_\rho(\rho) = M_R^{(1)} + \frac{\alpha E H^2}{12}[T_2(\eta) - T_2(1)]$$

$$M_t(\rho) = M_R^{(1)} + \frac{\alpha E H^2}{12}[T_3(\eta) - T_2(1)]. \tag{2.23}$$

2.2. Placa plană inelară

2.2.1. *Încovoierea datorită presiunii uniforme și forței inelare* [9], [40], [46]

Cu notațiile din figura 2.4, pentru placa plană inelară, simplu rezemată pe conturul exterior, încărcată cu presiunea uniformă p și forța inelară a cărei valoare totală este P, expresiile rotirilor pe conturul interior, respectiv exterior sînt :

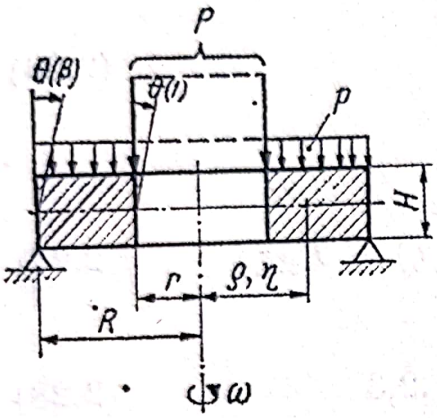


Fig. 2.4

$$\theta(1) = \frac{3Pr}{\pi EH^3} e_3(\mu,\beta) + \frac{3pR^3}{2EH^3\beta} e_4(\mu,\beta)$$

$$\theta(\beta) = \frac{3PR}{\pi EH^3} e_7(\mu,\beta) + \frac{3pR^3}{2EH^3} e_8(\mu,\beta) \tag{2.30}$$

în care s-au notat

$$\beta = \frac{R}{r} \tag{2.31}$$

$$e_3(\mu,\beta) = 1 - \mu + \frac{2\beta^2}{\beta^2 - 1}(1 + \mu)\ln\beta$$

$$e_4(\mu,\beta) = 3 + \mu - 4(1 + \mu)\frac{\ln\beta}{\beta^2 - 1} - \frac{1}{\beta^2}(1-\mu)$$

$$e_7(\mu,\beta) = 1-\mu + \frac{2}{\beta^2 - 1}(1 + \mu)\ln\beta \tag{2.32}$$

$$e_8(\mu,\beta) = \frac{1}{\beta^2}\left[1 + 3\mu + (1-\mu)\beta^2 - \frac{4(1+\mu)}{\beta^2 - 1}\ln\beta\right].$$

Momentele încovoietoare, radial și circumferențial, într-un punct oarecare al plăcii, sînt respectiv :

$$M_\rho(\eta) = \frac{P}{2\pi} u_3(\mu,\beta,\eta) + \frac{pR^2}{2} u_5(\mu,\beta,\eta)$$

$$M_t(\eta) = \frac{P}{2\pi} u_4(\mu,\beta,\eta) + \frac{pR^2}{2} u_6(\mu,\beta,\eta) \tag{2.33}$$

Scanned with OKEN Scanner

în care s-au notat:
abscisa adimensională

$$\eta = \frac{\rho}{r} \tag{2.34}$$

și funcțiile

$$u_3(\mu, \beta, \eta) = \frac{1+\mu}{2}\left[\frac{\beta^2}{\beta^2-1}\left(1-\frac{1}{\eta^2}\right)\ln\beta - \ln\eta\right]$$

$$u_4(\mu,\beta,\eta) = \frac{1+\mu}{2}\left[\frac{1-\mu}{1+\mu}+\frac{\beta^2}{\beta^2-1}\left(1+\frac{1}{\eta^2}\right)\ln\beta - \ln\eta\right]$$

$$u_5(\mu,\beta,\eta) = 2\left[\frac{1+\mu}{4\beta^2}\ln\eta - \frac{1+\mu}{4(\beta^2-1)}\left(1-\frac{1}{\eta^2}\right)\ln\beta - \right.$$

$$\left. - \frac{3+\mu}{16}(\eta^2-1)\left(\frac{1}{\beta^2}-\frac{1}{\eta^2}\right)\right] \tag{2.35}$$

$$u_6(\mu,\beta,\eta) = 2\left\{\frac{1+\mu}{4\beta^2}\ln\eta - \frac{1+\mu}{4(\beta^2-1)}\left(1+\frac{1}{\eta^2}\right)\ln\beta + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{16\beta^2}\left[(3+\mu)\left(1+\frac{1}{\eta^2}\right)\beta^2 - (1+3\mu)\eta^2 + 5\mu - 1\right]\right\}.$$

2.2.2. *Întinderea datorită mișcării de rotație* [8], [26]

Similar ca la punctul 2.1.2, se obțin deplasările pe conturul interior, respectiv exterior datorită întinderii plăcii ca urmare a mișcării de rotație:

$$\Delta r = \frac{\gamma\omega^2 r^3}{4gE}\, e_2(\mu,\beta)$$

$$\Delta R = \frac{\gamma\omega^2\beta r^3}{4gE}\, e_6(\mu,\beta) \tag{2.36}$$

în care s-au notat :

$$e_2(\mu,\beta) = 1 - \mu + (3 + \mu)\beta^2$$
$$e_6(\mu,\beta) = 3 + \mu + (1-\mu)\beta^2. \tag{2.37}$$

Tensiunile principale, într-un punct oarecare al plăcii, sînt :

$$\sigma_\rho(\eta) = \frac{\gamma R^2\omega^2}{gE} u_1(\mu,\beta,\eta)$$
$$\sigma_t(\eta) = \frac{\gamma R^2\omega^2}{gE} u_2(\mu,\beta,\eta) \tag{2.38}$$

în care s-au notat funcțiile

$$u_1(\mu,\beta,\eta) = \frac{3+\mu}{8}(1-\eta^2)\left(\frac{1}{\beta^2}-\frac{1}{\eta^2}\right)$$
$$u_2(\mu,\beta,\eta) = \frac{3+\mu}{8}\left(1+\frac{1}{\beta^2}+\frac{1}{\eta^2}-\frac{1+3\mu}{3+\mu}\cdot\frac{\eta^2}{\beta^2}\right). \tag{2.39}$$

2.2.3. *Întinderea datorită tensiunilor termice* [32]

Făcînd aceleași ipoteze ca la punctul 2.1.3, pentru placa inelară deplasarea radială într-un punct oarecare este

$$u(\rho) = \frac{(1+\mu)\alpha}{\rho}\int_r^\rho T(\rho)\rho d\rho + C_1\rho + \frac{C_2}{\rho} \tag{2.40}$$

în care $T(\rho)$ este funcția temperaturii, iar C_1 și C_2 constante de integrare.

Tensiunile într-un punct al plăcii sînt :

$$\sigma_\rho(\rho) = -\frac{E\alpha}{\rho^2}\int_r^\rho T(\rho)\rho d\rho + \frac{EC_1}{1-\mu} - \frac{EC_2}{(1+\mu)\rho^2} \tag{2.41'}$$

$$\sigma_t(\rho) = \frac{E\alpha}{\rho^2}\int_r^\rho T(\rho)\rho d\rho - E\alpha T(\rho) + \frac{EC_1}{1-\mu} + \frac{EC_2}{(1+\mu)\rho^2}. \tag{2.42'}$$

Scanned with OKEN Scanner

Pentru determinarea constantelor de integrare C_1 și C_2 se vor scrie condiții pe contururile plăcii. Se va considera că pe conturul interior acționează efortul $N_r^{(1)}$ iar pe conturul exterior $N_R^{(\beta)}$, ca în figura 2.5. Aceasta înseamnă că

$$\sigma_\rho(1) = \frac{N_r^{(1)}}{H} \quad \text{și} \quad \sigma_\rho(\beta) = \frac{N_R^{(\beta)}}{H}.$$

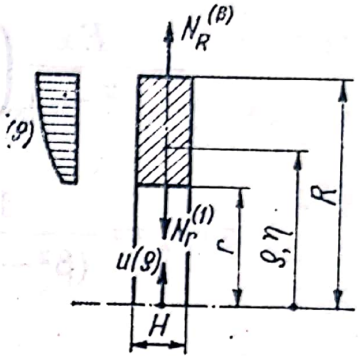


Fig. 2.5

Înlocuind aceste valori în relația (2.41′) se obțin ecuațiile

$$\frac{EC_1}{1-\mu} - \frac{EC_2}{(1+\mu)r^2} = \frac{N_r^{(1)}}{H},$$

$$\frac{EC_1}{1-\mu} - \frac{EC_2}{(1+\mu)R^2} - \frac{E\alpha}{R^2}\int_r^R T(\rho)\rho d\rho = \frac{N_R^{(\beta)}}{H}$$

din care se determină constantele de integrare C_1 și C_2. Rezultă

$$C_1 = \frac{1-\mu}{E}\left\{\frac{1}{H}\left[N_r^{(1)} + \frac{\beta^2}{\beta^2-1}[N_R^{(\beta)} - N_r^{(1)}]\right] + \frac{\beta^2}{\beta^2-1}\cdot\frac{E\alpha}{R^2}\int_r^R T(\rho)\rho d\rho\right\}$$

și

$$C_2 = \frac{1+\mu}{E}\cdot\frac{R^2}{\beta^2-1}\left\{\frac{1}{H}[N_R^{(\beta)} - N_r^{(1)}] + \frac{E\alpha}{R^2}\int_r^R T(\rho)\rho d\rho\right\}$$

cu care, din expresiile (2.40), (2.41′) și (2.42′) se obțin deplasările radiale pe contur și tensiunile într-un punct oarecare al plăcii:

$$\Delta r = \frac{2\beta}{\beta^2-1}\left\{\frac{R}{EH}\left[N_R^{(\beta)} - \frac{1+\mu}{2\beta^2}\left(\beta^2 + \frac{1-\mu}{1+\mu}\right)N_r^{(1)}\right] + \right.$$
$$\left. + \frac{\alpha}{R}\int_r^R T(\rho)\rho d\rho\right\} \qquad (2.43')$$

$$\Delta R = \frac{2\beta}{\beta^2-1}\left\{\frac{r}{EH}\left[\frac{1-\mu}{2}\left(\beta^2 + \frac{1+\mu}{1-\mu}\right)N_R^{(\beta)} - N_r^{(1)}\right] + \right.$$
$$\left. + \frac{\alpha}{r}\int_r^R T(\rho)\rho d\rho\right\} \qquad (2.43'')$$

$$\sigma_\rho(\rho) = \frac{1}{(\beta^2-1)H}\left\{\beta^2 N_R^{(\beta)} - N_r^{(1)} - \frac{R^2}{\rho^2}[N_R^{(\beta)} - N_r^{(1)}]\right\} + \tag{2.41''}$$

$$+\frac{E\alpha}{\beta^2-1}\left(\frac{1}{r^2}-\frac{1}{\rho^2}\right)\int_r^R T(\rho)\rho d\rho - \frac{E\alpha}{\rho^2}\int_r^\rho T(\rho)\rho d\rho$$

$$\sigma_t(\rho) = \frac{1}{(\beta^2-1)H}\left\{\beta^2 N_R^{(\beta)} - N_r^{(1)} + \frac{R^2}{\rho^2}[N_R^{(\beta)} - N_r^{(1)}]\right\} + \tag{2.42''}$$

$$+\frac{E\alpha}{\beta^2-1}\left(\frac{1}{r^2}+\frac{1}{\rho^2}\right)\int_r^R T(\rho)\rho d\rho - E\alpha T(\rho) + \frac{E\alpha}{\rho^2}\int_r^\rho T(\rho)\rho d\rho.$$

Dacă funcția de temperatură se consideră de forma (2.12) se obține

$$\int_r^\rho T(\rho)\rho d\rho = r^2\int_1^\eta T(\eta)\eta d\eta = r^2 T_1(\eta) \tag{2.44}$$

în care $T(\eta)$ este dat de (2.13'') și

$$\bar{a}_n = a_n r^n \quad \text{pentru} \quad n = 0,1,2,3, \tag{2.45}$$

$$T_1(\eta) = \sum_{n=0}^{3}\frac{\bar{a}_n}{n+2}(\eta^{n+2}-1). \tag{2.46}$$

Avînd în vedere relația (2.44) și notațiile (2.13''), (2.45) și (2.46), din (2.43'), (2.43''), (2.41'') și (2.42'') se obțin, în final, deplasările radiale pe contur

$$\Delta r = \frac{2\beta R}{\beta^2-1}\left[\frac{N_R^{(\beta)}}{EH} - \frac{1}{2\beta^2}\frac{N_r^{(1)}}{EH}e_1(\mu,\beta) + \frac{\alpha}{\beta^2}T_1(\beta)\right] \tag{2.47}$$

$$\Delta R = \frac{2R}{\beta^2-1}\left[\frac{1}{2}\cdot\frac{N_R^{(\beta)}}{EH}e_5(\mu,\beta) - \frac{N_r^{(1)}}{EH} + \alpha T_1(\beta)\right]$$

Scanned with OKEN Scanner

şi tensiunile dintr-un punct oarecare al plăcii

$$\sigma_\rho(\eta) = \frac{1}{H(\beta^2-1)}\left\{\beta^2 N_R^{(\beta)} - N_r^{(1)} - \frac{\beta^2}{\eta^2}\left[N_R^{(\beta)} - N_r^{(1)}\right]\right\} + E\alpha T_4(\beta,\eta) \tag{2.48}$$

$$\sigma_t(\eta) = \frac{1}{H(\beta^2-1)}\left\{\beta^2 N_R^{(\beta)} - N_r^{(1)} + \frac{\beta^2}{\eta^2}\left[N_R^{(\beta)} - N_r^{(1)}\right]\right\} + E\alpha T_5(\beta,\eta) \tag{2.49}$$

în care, s-au folosit notaţiile

$$e_1(\mu,\beta) = 1-\mu+(1+\mu)\beta^2 \tag{2.50}$$

$$e_5(\mu,\beta) = 1+\mu+(1-\mu)\beta^2$$

$$T_4(\beta,\eta) = \frac{1}{\beta^2-1}\left(1-\frac{1}{\eta^2}\right)T_1(\beta) - \frac{1}{\eta^2}T_1(\eta)$$

$$T_5(\beta,\eta) = \frac{1}{\beta^2-1}\left(1+\frac{1}{\eta^2}\right)T_1(\beta) + \frac{1}{\eta^2}T_1(\eta) - T(\eta).$$

2.2.4. *Încovoierea datorită tensiunilor termice* [32]

Considerentele avute în vedere la punctul 2.1.4, pentru calculul tensiunilor termice de încovoiere ale plăcii circulare, rămîn valabile şi pentru placa inelară. De asemenea rămîn valabile relaţiile (2.14—2.17).

Se consideră că pe conturul interior al plăcii acţionează momentul încovoietor $M_r^{(1)}$ iar pe cel exterior momentul $M_R^{(\beta)}$, ca în figura 2.6. Pentru placa inelară, soluţia ecuaţiei diferenţiale (2.15) este

$$w(\rho) = \frac{1+\mu}{H}\left[\int_r^\rho \frac{F(\rho)}{\rho}\,d\rho + C_1 + C_2\ln\rho + C_3\rho^2\right] \tag{2.51}$$

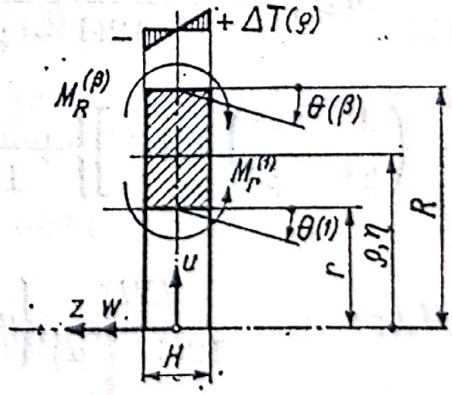


Fig. 2.6

în care

$$F(\rho) = \int_r^\rho \alpha\Delta T(\rho)\rho\,d\rho \tag{2.52}$$

şi C_1, C_2, C_3 sînt constante de integrare.

Scanned with OKEN Scanner

Se va nota

$$\Phi_0(\rho) = \frac{d^2}{d\rho^2}\left(\int_r^\rho \frac{F(\rho)}{\rho}\, d\rho\right) + \frac{\mu}{\rho}\cdot\frac{d}{d\rho}\left(\int_0^\rho \frac{F(\rho)}{\rho}\, d\rho\right) - \alpha\Delta T(\rho) \tag{2.53}$$

Din prima relație (2.16), avînd în vedere relația (2.51) și notațiile (2.52) și (2.53), se obțin condițiile la limită care vor permite determinarea constantelor de integrare. Astfel, se va scrie că momentul încovoietor radial are valoarea $M_r^{(1)}$ pe conturul interior al plăcii și $M_R^{(\beta)}$ pe cel exterior.

Se găsește că

$$C_2 = \frac{R^2}{(1-\beta^2)}\left\{\frac{12}{EH^2}\left[M_R^{(\beta)} - M_r^{(1)}\right] + \frac{1}{1-\mu}\left[\Phi_0(R) - \Phi_0(r)\right]\right\} \tag{2.54}$$

$$C_3 = \frac{1}{2(1+\mu)(1-\beta^2)}\left\{\frac{12(1-\mu)}{EH^2}\left[\beta^2 M_R^{(\beta)} - M_r^{(1)}\right] + \beta^2\Phi_0(R) - \Phi_0(r)\right\}.$$

Înlocuind expresiile constantelor de integrare (2.54) în relațiile (2.16), se obțin expresiile momentelor încovoietoare sub forma:

$$M_\rho(\rho) = -\frac{EH^2}{12(1-\mu)}\left\{\Phi_0(\rho) + \frac{\beta^2}{1-\beta^2}\left[\left(1-\frac{r^2}{\rho^2}\right)\Phi_0(R) - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \left(\frac{1}{\beta^2} - \frac{r^2}{\rho^2}\right)\Phi_0(r)\right]\right\} + \frac{1}{1-\beta^2}\left[\beta^2\left(\frac{r^2}{\rho^2} - 1\right)M_R^{(\beta)} - \left(\beta^2\frac{r^2}{\rho^2} - 1\right)M_r^{(1)}\right] \tag{2.55'}$$

$$M_t(\rho) = -\frac{EH^2}{12(1-\mu)}\left\{\mu\frac{d^2}{d\rho^2}\left(\int_r^\rho \frac{F(\rho)}{\rho}\, d\rho\right) + \frac{1}{\rho}\frac{d}{d\rho}\left(\int_r^\rho \frac{F(\rho)}{\rho}\, d\rho\right) - \right.$$

$$\left. - \alpha\Delta T(\rho) + \frac{\beta^2}{1-\beta^2}\left[\left(\frac{r^2}{\rho^2} + 1\right)\Phi_0(R) - \left(\frac{r^2}{\rho^2} + \frac{1}{\beta^2}\right)\Phi_0(r)\right]\right\} -$$

$$- \frac{1}{1-\beta^2}\left[\beta^2\left(\frac{r^2}{\rho^2} + 1\right)M_R^{(\beta)} - \left(\frac{r^2}{\rho^2}\beta^2 + 1\right)M_r^{(1)}\right].$$

Scanned with OKEN Scanner

Avînd în vedere că

$$\theta(\rho) = -\frac{dw}{d\rho},$$

rotirile plăcii pe cele două contururi sînt

$$\theta(1) = -\frac{1+\mu}{H}\left\{\frac{r}{(1-\mu^2)(1-\beta^2)}\,[2\beta^2\Phi_0(R) - [\beta^2(1+\mu)+1-\right.$$

$$\left.-\mu]\Phi_0(r)]\right\} + \frac{12\,r}{(\beta^2-1)EH^3}\{2\beta^2 M_R^{(\beta)} - [(1+\mu)\beta^2 + 1-\mu]M_r^{(1)}\}. \tag{2.56'}$$

$$\theta(\beta) = -\frac{1+\mu}{H}\left\{\left[\frac{d}{d\rho}\left(\int_r^\rho \frac{F(\rho)}{\rho}\,d\rho\right)\right]_{\rho=R} + \frac{R}{(1-\beta^2)(1-\mu^2)}[[1+\right.$$

$$\left.+\mu + (1-\mu)\beta^2]\Phi_0(R) - 2\Phi_0(r)]\right\} -$$

$$-\frac{12\,R}{(1-\beta^2)EH^3}\{[1+\mu+(1-\mu)\beta^2]\,M_R^{(\beta)} - 2M_r^{(1)}\}$$

Se consideră funcția de temperatură sub forma (2.25), utilizată pentru placa circulară. Se mențin notațiile (2.27) și (2.29), cu precizarea că dacă se are în vedere definiția abscisei adimensionale η, conform cu (2.34), atunci pentru placa inelară condițiile (2.28) devin

$$\bar{b}_n = b_n r^n \quad \text{pentru} \quad n = 0,1,2,3. \tag{2.57}$$

Desfășurînd calculele analog ca pentru placa circulară se obțin în final expresiile rotirilor pe contururile plăcii inelare

$$\theta(1) = \frac{2}{\beta(\beta^2-1)}\,\frac{R}{H}\left\{\alpha[T_2(1) - \beta^2 T_2(\beta)] + \right.$$

$$\left. + \frac{6}{EH^2}\,[2\beta^2 M_R^{(\beta)} - e_1(\mu,\beta)M_r^{(1)}]\right\} \tag{2.56}$$

$$\theta(\beta) = \frac{2}{\beta^2-1}\,\frac{R}{H}\left\{\alpha[T_2(1) - \beta^2 T_2(\beta)] + \right.$$

$$\left. + \frac{6}{EH^2}\,[e_5(\mu,\beta)\,M_R^{(\beta)} - 2M_r^{(1)}]\right\}$$

Scanned with OKEN Scanner

în care s-a folosit prima din notaţiile (2.27) şi primele două din notaţiile (2.50).

De asemenea rezultă momentele încovoietoare într-un punct oarecare al plăcii

$$M_\varphi(\eta) = \frac{1}{\beta^2 - 1}\left[E\alpha T_6(\beta, \eta) + \beta^2\left(1 - \frac{1}{\eta^2}\right) M_R^{(\beta)} + \left(\frac{\beta^2}{\eta^2} - 1\right) M_r^{(1)}\right] \tag{2.55}$$

$$M_t(\eta) = \frac{1}{\beta^2 - 1}\left[E\alpha T_7(\beta,\eta) + \beta^2\left(1 + \frac{1}{\eta^2}\right) M_R^{(\beta)} - \left(1 + \frac{\beta^2}{\eta^2}\right) M_r^{(1)}\right]$$

în care s-au notat

$$T_6(\beta,\eta) = \frac{1}{12}\left\{(\beta^2 - 1)\left[T_2(\eta) - \frac{T_2(1)}{\eta^2}\right] + \left(1 - \frac{1}{\eta^2}\right)[T_2(1) - \beta^2 T_2(\beta)]\right\} \tag{2.58}$$

$$T_7(\beta,\eta) = \frac{1}{12}\left\{(\beta^2 - 1)\left[\frac{T_2(1)}{\eta^2} + T_3(\eta)\right] + \left(1 + \frac{1}{\eta^2}\right)[T_2(1) - \beta^2 T_2(\beta)]\right\}$$

$T_3(\eta)$ fiind dat de (2.27).

2.3. Învelişul cilindric lung

2.3.1. *Întinderea şi încovoierea datorate presiunii uniforme, mişcării de rotaţie şi variaţiei temperaturii în lungul generatoarei* [32], [40], [46]

S-a considerat un înveliş cilindric cu perete subţire, solicitat axial simetric de o presiune interioară uniformă p şi o variaţie de temperatură $T(x)$, constantă pe grosimea h a învelişului. S-a presupus de asemenea că învelişul se află în mişcare de rotaţie faţă de axa sa, cu viteza unghiulară ω.

Cu notaţiile din figura 2.7, ecuaţia diferenţială a învelişului, scrisă în deplasări, este :

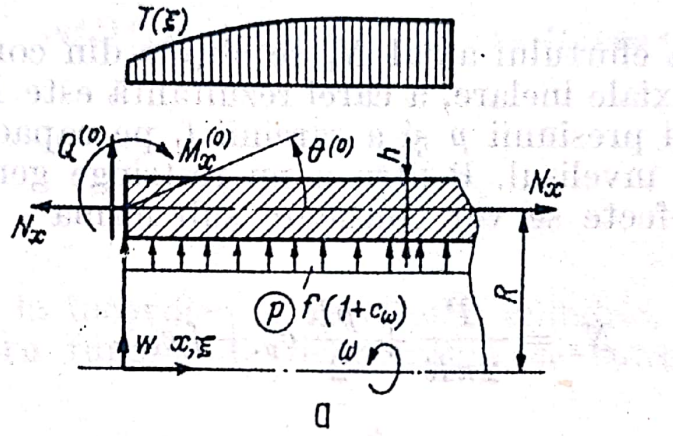
$$\frac{d^4 w}{d\xi^4} + 4\, w(\xi) = \frac{4R^2}{Eh}\, p_{total} - \frac{4\mu R}{Eh} N_x + 4R\alpha T(\xi) \tag{2.59}$$

în care ξ este abscisa adimensională, definită de relaţia

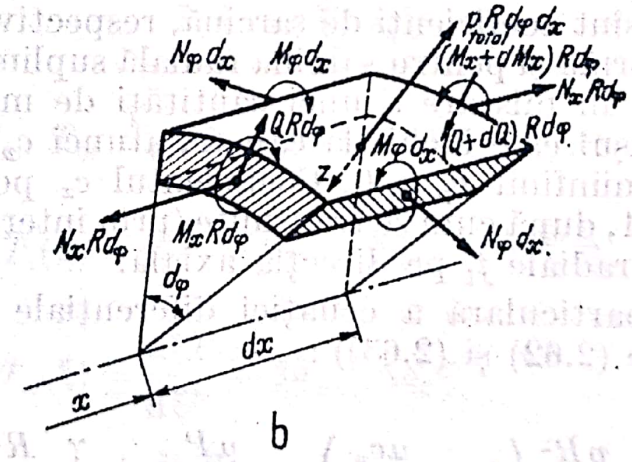
$$\xi = m_0 x \tag{2.60}$$

şi

$$m_0 = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{R^2 h^2}}. \tag{2.61}$$



a



b

Fig. 2.7

Mişcarea de rotaţie face să acţioneze pe suprafaţa mediană a învelişului o sarcină radială, uniform distribuită, de valoare

$$f = \frac{\gamma}{g} Rh\omega^2. \tag{2.62'}$$

Dacă în interiorul învelişului se află o cantitate oarecare de mediu gazos, lichid, pulverulent etc., care este antrenat în mişcare, aceasta va duce la apariţia unei sarcini radiale suplimentare, care în

Scanned with OKEN Scanner

calculele ce urmează se va considera ca un multiplu c_ω al sarcinii f, adică

$$f_1 = c_\omega f. \tag{2.62''}$$

Presiunea interioară totală va fi deci

$$p_{total} = p + f(1 + c_\omega). \tag{2.62}$$

Intensitatea efortului axial N_x se obține din considerarea acțiunii unei forțe axiale inelare, a cărei rezultantă este P și din considerarea efectului presiunii p și a sarcinii f_1 pe capacele care (eventual) ar închide învelișul. Pentru a nu restrînge generalitatea problemei, aceste efecte se vor considera sub forma

$$N_x = \frac{P}{2\pi R} + \frac{pR}{2} c_p + f\, c_\omega c_x \tag{2.63}$$

în care c_p și c_x sînt coeficienți de sarcină, respectiv pentru presiunea interioară uniformă și pentru sarcina radială suplimentară care apare prin antrenarea în mișcare a unei cantități de mediu gazos, lichid etc. Dacă învelișul este închis la capete, atunci $c_p = 1$, iar în cazul unui înveliș semiinfinit $c_p = 0$. Coeficientul c_x poate avea diverse valori între 0 și 1, după cum se transmite (prin intermediul capacelor), efectul sarcinii radiale f_1 pe direcția axială.

Integrala particulară a ecuației diferențiale (2.59) este (dacă se are în vedere (2.62) și (2.63)) :

$$w^*_{(\xi)} = \frac{pR^2}{Eh}\left(1 - \frac{\mu c_p}{2}\right) - \frac{\mu P}{2\pi Eh} + \frac{\gamma}{g}\frac{R^3\omega^2}{E}[1 + \tag{2.64}$$

$$+ c_\omega(1 - \mu c_x)] + R\alpha T(\xi)$$

Pentru un înveliș lung, integrala generală a ecuației (2.59) este convenabil să se scrie sub forma

$$w(\xi) = e^{-\xi}(C_1 \sin\xi + C_2 \cos\xi) + w^*(\xi), \tag{2.65}$$

în care C_1 și C_2 sînt constante de integrare, iar $w^*(\xi)$ este dat de (2.64)

Scanned with OKEN Scanner

Rotirea, momentele încovoietoare și eforturile tăietoare sînt, respectiv.

$$\theta(\xi) = \frac{dw}{dx} = m_0 \{e^{-\xi}[C_1(\cos\xi - \sin\xi) - C_2(\cos\xi + \sin\xi)] + R\alpha T_1(\xi)\}$$

$$M_x(\xi) = D\frac{d^2w}{dx^2} = m_0^2 D[2e^{-\xi}(-C_1\cos\xi + C_2\sin\xi) + R\alpha T_2(\xi)] \quad (2.66)$$

$$Q(\xi) = D\frac{d^3w}{dx^3} = m_0^3 D\{2e^{-\xi}[C_1(\cos\xi + \sin\xi) + C_2(\cos\xi - \sin\xi)] + R\alpha T_3\}$$

în care

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (2.67)$$

este rigiditatea la încovoiere a învelișului cilindric.

Dacă pentru funcția de temperatură se consideră polinomul

$$T(\xi) = \sum_{n=0}^{3} \bar{a}_n \xi^n \quad (2.68)$$

atunci funcțiile T_1, T_2, T_3 din relațiile (2.66) sînt

$$T_1(\xi) = \frac{dT}{d\xi} = \bar{a}_1 + 2\bar{a}_2\xi + 3\bar{a}_3\xi^2$$

$$T_2(\xi) = \frac{d^2T}{d\xi^2} = 2\bar{a}_2 + 6\bar{a}_3\xi \quad (2.69)$$

$$T_3 = \frac{d^3T}{d\xi^3} = 6\bar{a}_3.$$

Din relațiile (2.65), (2.66) se obțin expresiile deplasărilor și eforturilor în origine

$$\begin{aligned} w(0) &= C_2 + w^*(0) \\ \theta(0) &= m_0[C_1 - C_2 + R\alpha T_1(0)] \\ M_x(0) &= m_0^2 D[-2C_1 + R\alpha T_2(0)] \\ Q(0) &= m_0^3 D[2(C_1 + C_2) + R\alpha T_3]. \end{aligned} \quad (2.70)$$

Scanned with OKEN Scanner

Expresiile celorlalte două eforturi sînt

$$N_\varphi(\xi) = \frac{Eh}{R} w(\xi) + \mu N_x$$
$$M_\varphi(\xi) = \mu M_x(\xi) \tag{2.71}$$

expresii necesare pentru calculul tensiunilor principale ale învelișului.

2.3.2. *Întinderea și încovoierea datorate variației temperaturii pe grosime* [32], [40], [46]

Dacă diferența de temperatură între suprafața interioară și exterioară a învelișului este ΔT, atunci pentru un flux staționar de căldură, temperatura într-un punct de rază ρ al învelișului va fi

$$T = T_{ext} + \Delta T \frac{\ln \frac{R_{ext}}{\rho}}{\ln \frac{R_{ext}}{R_{int}}}.$$

Cînd $T_{ext} < T_{int}$, tensiunea maximă este de compresiune la interior și de întindere la exterior.

Pentru un înveliș subțire se poate considera că variația temperaturii pe grosimea peretelui este aproximativ liniară. În acest caz, pentru un înveliș lung, într-o secțiune suficient de depărtată de capete, tensiunile sînt

$$(\sigma_x)_{ext} = -(\sigma_x)_{int} = (\sigma_\varphi)_{ext} = -(\sigma_\varphi)_{int} = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu)} \tag{2.72}$$

în care variația ΔT a temperaturii, este constantă în lungul axei învelișului.

În capătul liber al învelișului tensiunile σ_x sînt nule. Pentru aceasta se consideră aplicat un moment încovoietor ca în figura 2.8, de valoare

$$(M_x)_{\xi=0} = M_0 = \frac{E\alpha\,\Delta T h^2}{12(1-\mu)}. \tag{2.73}$$

Observație. Introducerea momentului încovoietor este doar un artificiu pentru considerarea efectului de capăt liber al învelișului. El nu există ca atare.

Ecuația diferențială (2.59) devine în aceast caz

$$\frac{d^4 w}{d\xi^4} + 4w(\xi) = 0 \qquad (2.74)$$

a cărei soluție este (2.65), în care $w^* \equiv 0$, adică

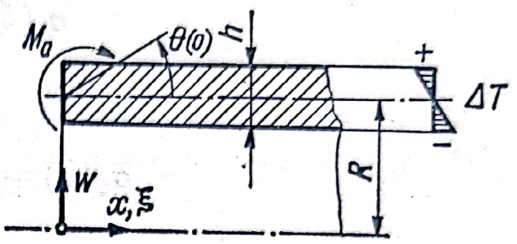


Fig. 2.8

$$w(\xi) = e^{-\xi}(C_1 \sin\xi + C_2 \cos\xi). \qquad (2.65')$$

Scriind condițiile:
pentru

$$\xi = 0, \quad M_x = M_0 \quad \text{și} \quad Q = 0 \qquad (2.75)$$

se determină constantele de integrare C_1 și C_2 din relația (2.65'). Se obține

$$C_2 = -C_1 = \frac{M_0}{2\, m_0^2 D}.$$

Introducînd aceste valori în expresia (2.65') și avînd în vedere relațiile de calcul pentru rotire și eforturi, se obține:

$$w(\xi) = \frac{M_0}{2m_0^2 D} e^{-\xi}(\cos\xi - \sin\xi)$$

$$\theta(\xi) = -\frac{M_0}{m_0 D} e^{-\xi} \cos\xi$$

$$M_\varphi(\xi) = \mu M_x(\xi) = \mu M_0[e^{-\xi}(\cos\xi + \sin\xi) - 1] \qquad (2.76)$$

$$N_x(\xi) = 0$$

$$N_\varphi(\xi) = \frac{Eh M_0}{2Rm_0^2 D} e^{-\xi}(\cos\xi - \sin\xi).$$

Tensiunile principale într-o secțiune de abscisă ξ a învelișului, calculate pe suprafața exterioară, respectiv interioară, sînt

$$\sigma_x(\xi) = \mp \frac{6\, M_x(\xi)}{h^2}$$

$$\sigma_\varphi(\xi) = \frac{N_\varphi(\xi)}{h} \mp \frac{6\, M_\varphi(\xi)}{h^2} \tag{2.77'}$$

sau, avînd în vedere relațiile (2.76)

$$\sigma_x(\xi) = \mp \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu)} [e^{-\xi}(\cos\xi + \sin\xi) - 1]$$

$$\sigma_\varphi(\xi) = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu)} \left\{ \left[\frac{\sqrt{3(1-\mu^2)}}{3} (\cos\xi - \sin\xi) \mp \mu(\cos\xi + \sin\xi) \right] e^{-\xi} \pm 1 \right\}. \tag{2.77}$$

Expresiile deplasărilor și intensităților eforturilor de legătură în origine, se obțin din (2.76), avînd în vedere și notațiile (2.61), (2.67)

$$w(0) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1+\mu}{3(1-\mu)}} \cdot R\alpha\Delta T$$

$$\theta(0) = -\frac{1+\mu}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}} \alpha\, \Delta\, T \sqrt{\frac{R}{h}} \tag{2.78}$$

$$M_x(0) = 0$$

$$Q(0) = 0.$$

2.4. Învelișul cilindric scurt

2.4.1. *Întinderea și încovoierea datorate presiunii uniforme, mișcării de rotație și variației temperaturii în lungul generatoarei* [24], [32], [40], [46]

Principalele considerații făcute la punctul 2.3.1 pentru învelișul lung, rămîn valabile și pentru învelișul scurt. De asemenea se păstrează notațiile și relațiile (2.60) — (2.62). Ecuația diferențială (2.59) și relațiile (2.71) se păstrează de asemenea.

Scanned with OKEN Scanner

În expresiile (2.63) și (2.64), pentru învelișul scurt, totdeauna $c_p = 1$, astfel încît

$$N_x = \frac{P}{2\pi R} + \frac{pR}{2} + fc_\omega c_x \tag{2.79}$$

$$w^*(\xi) = \frac{pR^2}{Eh}\left(1 - \frac{\mu}{2}\right) - \frac{\mu P}{2\pi Eh} + \frac{\gamma}{g}\frac{R^3\omega^2}{E}[1 + c_\omega(1 - \mu c_x)] + R\alpha T(\xi)$$

în care $T(\xi)$ se consideră tot de forma (2.68). De asemenea se păstrează notațiile (2.69).

Soluția ecuației diferențiale (2.65) este mai convenabil să se scrie, pentru învelișul scurt, sub forma

$$w(\xi) = \sum_{i=1}^{4} C_i V_i(\xi) + w^*(\xi) \tag{2.80'}$$

în care C_1, C_2, C_3, C_4 sînt constante de integrare, iar $V_1(\xi)$, $V_2(\xi)$, $V_3(\xi)$, $V_4(\xi)$, funcțiile Krîlov de argument ξ:

$$\begin{aligned} V_1(\xi) &= \operatorname{ch}\ \xi \cos\ \xi \\ V_2(\xi) &= \frac{1}{2}(\operatorname{ch}\ \xi \sin\xi + \operatorname{sh}\ \xi \cos\xi), \\ V_3(\xi) &= \frac{1}{2}\operatorname{sh}\ \xi \sin\ \xi \\ V_4(\xi) &= \frac{1}{4}(\operatorname{ch}\xi \sin\xi - \operatorname{sh}\xi \cos\xi). \end{aligned} \tag{2.81}$$

Avînd în vedere relația (2.80) și prima parte a expresiilor (2.66), se obține rotirea și intensitățile eforturilor de legătură

$$\theta(\xi) = m_0[-4C_1V_4(\xi) + C_2V_1(\xi) + C_3V_2(\xi) + C_4V_3(\xi) + R\alpha T_1(\xi)] \tag{2.80''}$$

$$M_x(\xi) = m_0^2 D[-4C_1V_3(\xi) - 4C_2V_4(\xi) + C_3V_1(\xi) + C_4V_2(\xi) + R\alpha T_2(\xi)], \tag{2.80'''}$$

$$Q(\xi) = m_0^3 D[-4C_1V_2(\xi) - 4C_2V_3(\xi) - 4C_3V_4(\xi) + C_4V_1(\xi) + R\alpha T_3]. \tag{2.80^{IV}}$$

Scanned with OKEN Scanner

Dacă lungimea învelişului este L, se notează

$$\lambda = \xi_{max} = m_0 L = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\ \frac{L}{R}\sqrt{\frac{R}{h}}. \qquad (2.82)$$

Ca element component al unei structuri axial simetrice, învelişul cilindric scurt din figura 2.9 poate fi legat cu alte elemente ale structurii pe ambele contururi, numai pe conturul din stînga ($\xi = 0$)

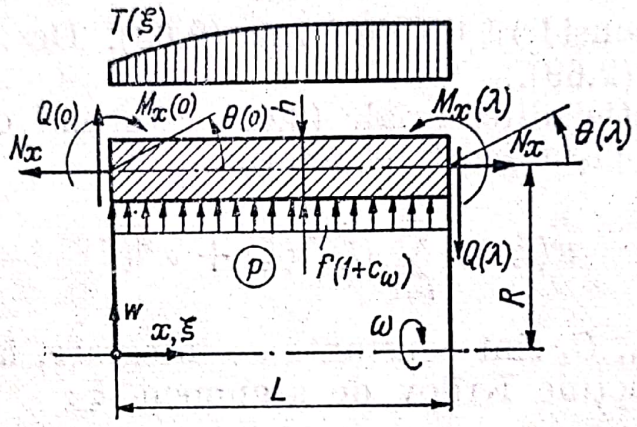


Fig. 2.9

sau numai pe conturul din dreapta ($\xi = \lambda$). În cele ce urmează se dau expresiile deplasărilor şi intensităţilor eforturilor de contur, necesare scrierii condiţiilor de continuitate, pentru situaţiile care prezintă interes practic.

1°. Înveliş cu ambele contururi de legătură

Din relaţiile (2.80) se obţine

$$1)\ w(0) = C_1 + w^*(0)$$

$$2)\ \theta(0) = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\frac{R}{h}}\left[\frac{C_2}{R} + \alpha T_1(0)\right]$$

$$3)\ M_x(0) = \frac{Eh^2}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\left[\frac{C_3}{R} + \alpha T_2(0)\right]$$

$$4)\ Q(0) = \frac{Eh}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{h}{R}}\left[\frac{C_4}{R} + \alpha T_3\right] \qquad (2.83)$$

Scanned with OKEN Scanner

$$5)\ w(\lambda) = \sum_{i=1}^{4} C_i V_i(\lambda) + w^*(\lambda)$$

$$6)\ \theta(\lambda) = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\frac{R}{h}}\cdot\frac{1}{R}[-4C_1V_4(\lambda) + C_2V_1(\lambda) + C_3V_2(\lambda) + C_4V_3(\lambda) + R\alpha T_1(\lambda)] \tag{2.83}$$

$$7)\ M_x(\lambda) = \frac{Eh^2}{4R\sqrt{3(1-\mu^2)}}[-4C_1V_3(\lambda) - 4C_2V_4(\lambda) + C_3V_1(\lambda) + C_4V_2(\lambda) + R\alpha T_2(\lambda)]$$

$$8)\ Q(\lambda) = \frac{Eh}{4R\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{h}{R}}[-4C_1V_2(\lambda) - 4C_2V_3(\lambda) - 4C_3V_4(\lambda) + C_4V_1(\lambda) + R\alpha T_3].$$

2°. Înveliș cu conturul din stînga ($\xi = 0$) liber și conturul din dreapta ($\xi = \lambda$) de legătură

În locul primelor patru condiții (2.83) se scriu condițiile de contur liber, adică

$$M_x(0) = 0 \quad \text{și} \quad Q(0) = 0.$$

Rezultă

$$C_3 = -R\alpha T_2(0), \qquad C_4 = -R\alpha T_3. \tag{2.84}$$

Dacă valorile (2.84) se înlocuiesc în ultimele patru din relațiile (2.83) se obține

$$1)\ w(\lambda) = C_1V_1(\lambda) + C_2V_2(\lambda) + w^*(\lambda) - R\alpha[T_2(0)V_3(\lambda) + T_3V_4(\lambda)]$$

$$2)\ \theta(\lambda) = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\frac{R}{h}}\left\{\frac{1}{R}[-4C_1V_4(\lambda) + C_2V_1(\lambda)] + \alpha[T_1(\lambda) - T_2(0)V_2(\lambda) - T_3V_3(\lambda)]\right\} \tag{2.85}$$

Scanned with OKEN Scanner

$$3)\quad M_x(\lambda)=\frac{Eh^2}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\left\{-\frac{4}{R}[C_1V_3(\lambda)+C_2V_4(\lambda)]+\alpha[T_2(\lambda)-\right.$$

$$\left.-T_2(0)V_1(\lambda)-T_3V_2(\lambda)]\right\} \tag{2.85}$$

$$4)\quad Q(\lambda)=\frac{Eh}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{h}{R}}\left\{-\frac{4}{R}[C_1V_2(\lambda)+C_2V_3(\lambda)]+\alpha[T_3[1-\right.$$

$$\left.-V_1(\lambda)]+4T_2(0)V_4(\lambda)]\right\}$$

3°. Înveliș simetric față de conturul din stînga ($\xi=0$) și conturul din dreapta ($\xi=\lambda$) de legătură

Dacă conturul din origine este contur de simetrie, atunci

$$\theta(0)=0 \quad \text{și} \quad Q(0)=0.$$

Din a doua și a patra relație (2.83) rezultă

$$C_2=-R\alpha T_1(0).$$
$$C_4=-R\alpha T_3 \tag{2.86}$$

Înlocuind (2.86) în ultimele patru din relațiile (2.83), se obține

$$1)\quad w(\lambda)=C_1V_1(\lambda)+C_3V_3(\lambda)+w^*(\lambda)-R\alpha[T_1(0)V_2(\lambda)+T_3V_4(\lambda)]$$

$$2)\quad \theta(\lambda)=\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\frac{R}{h}}\left\{\frac{1}{R}[-4C_1V_4(\lambda)+C_3V_2(\lambda)]+\alpha[T_1(\lambda)-\right.$$

$$\left.-T_1(0)V_1(\lambda)-T_3V_3(\lambda)]\right\} \tag{2.87}$$

$$3)\quad M_x(\lambda)=\frac{Eh^2}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\left\{\frac{1}{R}[-4C_1V_3(\lambda)+C_3V_1(\lambda)]+\alpha[T_2(\lambda)+\right.$$

$$\left.+4T_1(0)V_4(\lambda)-T_3V_2(\lambda)]\right\}$$

$$4)\quad Q(\lambda)=\frac{Eh}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{h}{R}}\left\{-\frac{4}{R}[C_1V_2(\lambda)+C_3V_4(\lambda)]+\alpha[T_3[1-\right.$$

$$\left.-V_1(\lambda)]+4T_1(0)V_3(\lambda)]\right\}.$$

Scanned with OKEN Scanner

4°. Înveliș cu conturul din stînga ($\xi=0$) de legătură și conturul din dreapta ($\xi=\lambda$) liber

Condițiile de contur liber în dreapta sînt

$$M_x(\lambda) = 0 \quad \text{și} \quad Q(\lambda) = 0.$$

Din ultimele două relații (2.83) rezultă

$$\begin{aligned} 4C_1V_3(\lambda) + 4C_2V_4(\lambda) - C_3V_1(\lambda) - C_4V_2(\lambda) &= R\alpha T_2(\lambda) \\ 4C_1V_2(\lambda) + 4C_2V_3(\lambda) + 4C_3V_4(\lambda) - C_4V_1(\lambda) &= R\alpha T_3. \end{aligned} \tag{2.88}$$

Din acest sistem de ecuații se scot constantele C_3 și C_4 funcție de constantele C_1 și C_2.

Pentru exprimarea mai comodă a soluțiilor respective se introduc funcțiile lui Rayleigh

$$\begin{aligned} U_{01}(\xi) &= \frac{1}{2}(\operatorname{ch}\xi + \cos\xi) \\ U_{02}(\xi) &= \frac{1}{2}(\operatorname{sh}\xi + \sin\xi) \\ U_{03}(\xi) &= \frac{1}{2}(\operatorname{ch}\xi - \cos\xi) \\ U_{04}(\xi) &= \frac{1}{2}(\operatorname{sh}\xi - \sin\xi). \end{aligned} \tag{2.89}$$

Se obține

$$\begin{aligned} C_3 &= 4\,U_7(\lambda)C_1 + 4U_8(\lambda)C_2 + R\alpha[U_{12}(\lambda)T_3 - U_{11}(\lambda)T_2(\lambda)] \\ C_4 &= 4U_9(\lambda)C_1 - 4U_7(\lambda)C_2 - R\alpha[U_{11}(\lambda)T_3 + 4U_{13}(\lambda)T_2(\lambda)] \end{aligned} \tag{2.90}$$

în care

$$U_7(\lambda) = -2\frac{U_{01}(\lambda)U_{03}(\lambda)}{U_{10}(\lambda)}$$

$$U_8(\lambda) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{U_{04}(2\lambda)}{U_{10}(\lambda)}$$

$$U_9(\lambda) = \frac{U_{02}(2\lambda)}{U_{10}(\lambda)}$$

$$U_{10}(\lambda) = \operatorname{ch}^2\lambda + \cos^2\lambda \qquad (2.91)$$

$$U_{11}(\lambda) = \frac{2V_1(\lambda)}{U_{10}(\lambda)}$$

$$U_{12}(\lambda) = \frac{2V_2(\lambda)}{U_{10}(\lambda)}$$

$$U_{13}(\lambda) = \frac{2V_4(\lambda)}{U_{10}(\lambda)}$$

Înlocuind (2.90) în primele patru din relaţiile (2.83), se obţine

1) $w(0) = C_1 + w^*(0)$

2) $\theta(0) = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\frac{R}{h}}\left[\frac{C_2}{R} + \alpha T_1(0)\right]$

3) $M_x(0) = \frac{Eh^2}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\left\{\frac{4}{R}[U_7(\lambda)C_1 + U_8(\lambda)C_2] + \alpha[U_{12}(\lambda)T_3 - \right.$

$\left. - U_{11}(\lambda)T_2(\lambda) + T_2(0)]\right\}$ (2.92)

4) $Q(0) = \frac{Eh}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{h}{R}}\left\{\frac{4}{R}[U_9(\lambda)C_1 - U_7(\lambda)C_2] - \right.$

$\left. - \alpha[T_3[U_{11}(\lambda) - 1] + 4U_{13}(\lambda)T_2(\lambda)]\right\}$

Scanned with OKEN Scanner

5°. Înveliș cu conturul din stînga ($\xi = 0$) de legătură, simetric față de conturul din dreapta ($\xi = \lambda$)

Condițiile de simetrie față de conturul din dreapta sînt

$$\theta(\lambda) = 0 \quad \text{și} \quad Q(\lambda) = 0. \tag{2.93}$$

Înlocuind condițiile (2.93) în cea de a șasea și în cea de a opta din relațiile (2.83) rezultă

$$\begin{aligned} -4C_1V_4(\lambda) + C_2V_1(\lambda) + C_3V_2(\lambda) + C_4V_3(\lambda) &= -R\alpha T_1(\lambda) \\ 4C_1V_2(\lambda) + 4C_2V_3(\lambda) + 4C_3V_4(\lambda) - C_4V_1(\lambda) &= R\alpha T_3 \end{aligned} \tag{2.94}$$

Se scot constantele de integrare C_3 și C_4 funcție de constantele C_1 și C_2. Rezultă

$$\begin{aligned} C_3 &= -4U_1(2\lambda)C_1 - U_{15}(\lambda)C_2 - R\alpha[U_{18}(\lambda)T_1(\lambda) - U_{19}(\lambda)T_3] \\ C_4 &= 4U_{16}(\lambda)C_1 + 4U_1(2\lambda)C_2 + R\alpha[4U_5(\lambda)T_1(\lambda) - U_6(\lambda)T_3] \end{aligned} \tag{2.95}$$

în care

$$\begin{aligned} U_1(\lambda) &= \frac{1}{2}\frac{U_{04}(\lambda)}{U_{02}(\lambda)}, & U_{16}(\lambda) &= \frac{4U_{01}(\lambda)U_{03}(\lambda)}{U_{02}(2\lambda)} \\ U_5(\lambda) &= -\frac{2V_4(\lambda)}{U_{02}(2\lambda)}, & U_{18}(\lambda) &= \frac{2V_1(\lambda)}{U_{02}(2\lambda)} \\ U_6(\lambda) &= \frac{2V_2(\lambda)}{U_{02}(2\lambda)}, & U_{19}(\lambda) &= \frac{2V_3(\lambda)}{U_{02}(2\lambda)} \\ U_{15}(\lambda) &= \frac{2(\mathrm{ch}^2\lambda - \sin^2\lambda)}{U_{02}(2\lambda)}. \end{aligned} \tag{2.96}$$

Înlocuind (2.95) în primele patru din relațiile (2.83), se obține

1) $w(0) = C_1 + w^*(0)$

$$2)\quad \theta(0)=\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\frac{R}{h}}\left[\frac{C_2}{R}+\alpha T_1(0)\right]$$

$$3)\quad M_x(0)=\frac{Eh^2}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\left\{-\frac{1}{R}\left[4U_1(2\lambda)C_1+U_{15}(\lambda)C_2\right]-\right.$$

$$\left.-\alpha\left[U_{18}(\lambda)T_1(\lambda)-U_{19}(\lambda)T_3-T_2(0)\right]\right\} \qquad (2.97)$$

$$4)\quad Q(0)=\frac{Eh}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{h}{R}}\left\{\frac{4}{R}\left[U_{16}(\lambda)C_1+U_1(2\lambda)C_2\right]+\right.$$

$$\left.+\alpha\left[4U_5(\lambda)T_1(\lambda)+T_3[1-U_6(\lambda)]\right]\right\}.$$

2.4.2. *Întinderea și încovoierea datorate variației temperaturii pe grosime* [32], [40], [46]

Se procedează la fel ca pentru învelișul lung. Relațiile (2.72) —(2.74) rămîn valabile. Pentru învelișul scurt soluția ecuației diferențiale (2.74) se scrie sub forma

$$w(\xi)=\sum_{i=1}^{4}C_iV_i(\xi) \qquad (2.98)$$

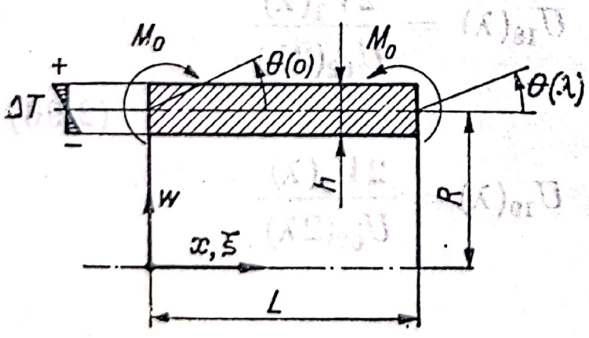


Fig. 2.10

care este de fapt soluția (2.80′) în care $w^*(\xi)\equiv 0$.

1°. **Înveliș scurt, liber la ambele capete**

Se consideră că învelișului i se aplică la ambele capete momentele încovoietoare M_0, avînd intensitatea dată de relația (2.73).

Pentru determinarea constantelor de integrare se scriu condițiile

$$M_x(0)=M_0;\qquad Q(0)=0$$

$$M_x(\lambda)=M_0;\qquad Q(\lambda)=0. \qquad (2.99)$$

Scanned with OKEN Scanner

Rezultă

$$C_1 = U_1(\lambda)\frac{M_0}{m_0^2 D}, \qquad C_2 = U_2(\lambda)\frac{M_0}{m_0^2 D}$$

$$C_3 = \frac{M_0}{m_0^2 D}, \qquad C_4 = 0 \tag{2.100}$$

în care

$$U_2(\lambda) = -\frac{U_{03}(\lambda)}{U_{02}(\lambda)} \tag{2.101}$$

celelalte notaţii păstrîndu-şi semnificaţiile precizate anterior.

Introducînd valorile (2.100) ale constantelor de integrare în expresia (2.98) şi avînd în vedere relaţiile de calcul pentru rotire şi eforturi, se obţine:

$$w(\xi) = \sqrt{\frac{1+\mu}{3(1-\mu)}}\, R\alpha\Delta T[U_1(\lambda)V_1(\xi) + U_2(\lambda)V_2(\xi) + V_3(\xi)],$$

$$\theta(\xi) = \frac{1+\mu}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\,\alpha\Delta T\,\sqrt{\frac{R}{h}}\,[-4U_1(\lambda)V_4(\xi) + U_2(\lambda)V_1(\xi) + V_2(\xi)], \tag{2.102}$$

$$M_\varphi(\xi) = \mu M_x(\xi) = \mu M_0[-4U_1(\lambda)V_3(\xi) - 4U_2(\lambda)V_4(\xi) + V_1(\xi) - 1]$$

$$N_x(\xi) = 0$$

$$N_\varphi(\xi) = \sqrt{\frac{1+\mu}{3(1-\mu)}}\, Eh\alpha\Delta T[U_1(\lambda)V_1(\xi) + U_2(\lambda)V_2(\xi) + V_3(\xi)].$$

Pentru calculul tensiunilor principale într-o secţiune de abscisă ξ, se utilizează relaţiile (2.77'), în care se introduc expresiile (2.102) ale eforturilor. Se obţine

$$\sigma_x(\xi) = \mp\,\chi_1(\xi,\lambda,\mu)E\,\alpha\,\Delta T$$

$$\sigma_\varphi(\xi) = [\chi_2(\xi,\lambda,\mu) \mp \chi_3(\xi,\lambda,\mu)]E\,\alpha\,\Delta T \tag{2.103}$$

Scanned with OKEN Scanner

în care s-au notat

$$\chi_1(\xi,\lambda,\mu) = \frac{1}{2(1-\mu)}\left[-4U_1(\lambda)V_3(\xi) - 4U_2(\lambda)V_4(\xi) + V_1(\xi) - 1\right]$$

$$\chi_2(\xi,\lambda,\mu) = \sqrt{\frac{1+\mu}{3(1-\mu)}}\left[U_1(\lambda)V_1(\xi) + U_2(\lambda)V_2(\xi) + V_3(\xi)\right] \tag{2.104}$$

$$\chi_3(\xi,\lambda,\mu) = \mu\chi_1(\xi,\lambda,\mu) - \frac{1}{2}.$$

Expresiile deplasărilor şi intensităţilor eforturilor de legătură la capetele învelişului se obţin din (2.102) :

$$w(0) = \sqrt{\frac{1+\mu}{3(1-\mu)}}\, R\alpha\Delta T U_1(\lambda)$$

$$\theta(0) = \frac{1+\mu}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{R}{h}}\,\alpha\Delta T U_2(\lambda) \tag{2.105}$$

$$w(\lambda) = \chi_2(\lambda,\lambda,\mu) R\,\alpha\,\Delta T$$

$$\theta(\lambda) = \chi_7(\lambda,\mu)\sqrt{\frac{R}{h}}\,\alpha\Delta T$$

$$M_x(0) = M_x(\lambda) = Q(0) = Q(\lambda) = 0$$

în care s-a notat

$$\chi_7(\lambda,\mu) = -\frac{1+\mu}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}} U_2(\lambda). \tag{2.106}$$

Observaţie. Toate relaţiile găsite pentru învelişul liber la ambele capete, se pot utiliza şi pentru cazul cînd unul din cele două capete sau chiar amîndouă sînt de legătură. Pentru acestea se vor suprapune efectele corespunzătoare, găsite la punctele 2.4.1.1°,2°,4°.

Scanned with OKEN Scanner

2°. Înveliș cu conturul din stînga ($\xi = 0$) liber, simetric față de conturul din dreapta ($\xi = \lambda$)

În acest caz condițiile la limită sînt

$$M_x(0) = M_0; \qquad Q(0) = 0$$
$$\theta(\lambda) = 0; \qquad Q(\lambda) = 0. \tag{2.107}$$

Rezultă

$$C_1 = U_3(\lambda)\frac{M_0}{m_0^2 D}, \qquad C_2 = U_4(\lambda)\frac{M_0}{m_0^2 D}$$
$$C_3 = \frac{M_0}{m_0^2 D}, \qquad C_4 = 0, \tag{2.108}$$

în care

$$U_3(\lambda) = \frac{1}{2}\cdot\frac{U_{03}(\lambda)}{U_{01}(\lambda)}, \qquad U_4(\lambda) = -\frac{U_{02}(\lambda)}{U_{01}(\lambda)}. \tag{2.109}$$

Se observă că valorile (2.108) ale constantelor de integrare se pot obține din cele obținute la punctul 2.4.2.1° adică din relațiile (2.100), dacă se înlocuiește $U_1(\lambda)$ cu $U_3(\lambda)$ și $U_2(\lambda)$ cu $U_4(\lambda)$.

Se obține, în consecință

$$\sigma_x(\xi) = \mp\, \chi_4(\xi,\lambda,\mu) E\,\alpha\,\Delta T$$
$$\sigma_\varphi(\xi) = [\chi_5(\xi,\lambda,\mu) \mp \chi_6(\xi,\lambda,\mu)] E\alpha\,\Delta T \tag{2.110}$$

în care s-au notat

$$\chi_4(\xi,\lambda,\mu) = \frac{1}{2(1-\mu)}[-4U_3(\lambda)V_3(\xi) - 4U_4(\lambda)V_4(\xi) + V_1(\xi) - 1]$$
$$\chi_5(\xi,\lambda,\mu) = \sqrt{\frac{1+\mu}{3(1-\mu)}}[U_3(\lambda)V_1(\xi) + U_4(\lambda)V_2(\xi) + V_3(\xi)] \tag{2.111}$$
$$\chi_6(\xi,\lambda,\mu) = \mu\chi_4(\xi,\lambda,\mu) - \frac{1}{2}.$$

Scanned with OKEN Scanner

De asemenea rezultă :

$$w(0) = \sqrt{\frac{1+\mu}{3(1-\mu)}}\, R\alpha\Delta T U_3(\lambda),$$

$$\theta(0) = \frac{1+\mu}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}} \sqrt{\frac{R}{h}}\, \alpha\Delta T U_4(\lambda), \tag{2.112}$$

$$M_x(0) = Q(0) = 0.$$

Observaţie. Valorile $w(\lambda)$, $\theta(\lambda)$, $M_x(\lambda)$, $Q(\lambda)$ nu interesează deoarece conturul din dreapta ($\xi = \lambda$) nu este de legătură.

3°. **Înveliş simetric faţă de origine** ($\xi = 0$), **cu conturul din dreapta** ($\xi = \lambda$) **liber**

Pentru această situaţie condiţiile la limită sînt

$$\theta(0) = 0, \quad Q(0) = 0$$
$$M_x(\lambda) = M_0, \quad Q(\lambda) = 0. \tag{2.113}$$

Rezultă

$$C_1 = U_5(\lambda)\frac{M_0}{m_0^2 D}, \qquad C_2 = 0$$
$$C_3 = U_6(\lambda)\frac{M_0}{m_0^2 D}, \qquad C_4 = 0. \tag{2.114}$$

Procedînd analog ca la punctele 2.4.2.1°. şi 2°. se obţin expresiile tensiunilor termice de încovoiere

$$\sigma_x(\xi) = \mp\, \chi_{10}(\xi, \lambda, \mu)\, E\alpha\Delta T$$
$$\sigma_\varphi(\xi) = [\chi_8(\xi, \lambda, \mu) \mp \chi_{11}(\xi, \lambda, \mu)]\, E\alpha\Delta T \tag{2.115}$$

în care

$$\chi_8(\xi, \lambda, \mu) = \sqrt{\frac{1+\mu}{3(1-\mu)}}\, [U_5(\lambda) V_1(\xi) + U_6(\lambda)\, V_3(\xi)]$$

Scanned with OKEN Scanner

$$\chi_{10}(\xi, \lambda, \mu) = \frac{1}{2(1-\mu)}\left[-4U_5(\lambda)V_3(\xi) + U_6(\lambda)\,V_1(\xi) - 1\right] \tag{2.116}$$

$$\chi_{11}(\xi, \lambda, \mu) = \mu\chi_{10}(\xi, \lambda, \mu) - \frac{1}{2}.$$

De asemenea rezultă

$$w(\lambda) = \chi_8(\lambda, \lambda, \mu)\, R\alpha\Delta T$$

$$\theta(\lambda) = \chi_9(\lambda, \mu)\sqrt{\frac{R}{h}}\,\alpha\Delta T \tag{2.117}$$

$$M_x(\lambda) = Q(\lambda) = 0$$

în care

$$\chi_9(\lambda, \mu) = \frac{1+\mu}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\,U_{16}(\lambda). \tag{2.118}$$

Observație. Valorile $w(0)$, $\theta(0)$, $M_x(0)$, $Q(0)$, nu interesează, deoarece conturul din origine ($\xi = 0$) nu este de legătură.

2.5. Învelișul conic

2.5.1. *Formule și notații de bază* [34], [40]

Ecuațiile diferențiale, scrise funcție de variabilele θ și V, pentru învelișul conic de grosime constantă cu o solicitare axială simetrică, sînt

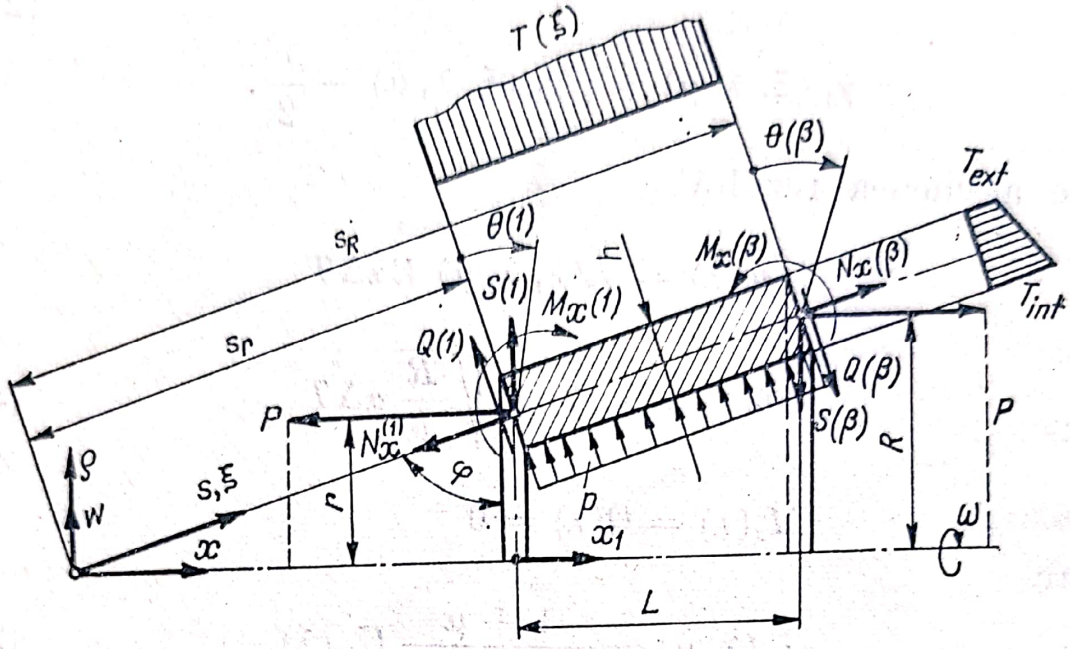
$$L_1(V) = Eh\theta\,\mathrm{tg}\varphi + F_0(s),$$

$$L_1(\theta) = -\frac{V}{D}\,\mathrm{tg}\,\varphi + \frac{F_2(s)}{h^3}\,\mathrm{tg}\,\varphi \tag{2.119}$$

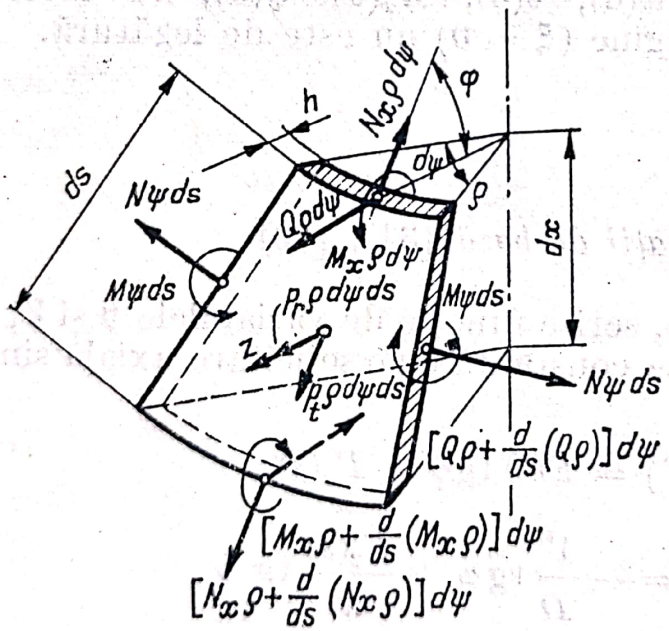
în care s-au folosit notațiile din figura 2.11 și:

$$L_1(*) = s\frac{\mathrm{d}^2(*)}{\mathrm{d}s^2} + \frac{\mathrm{d}(*)}{\mathrm{d}s} - \frac{(*)}{s}$$

Scanned with OKEN Scanner



a



b

Fig. 2.11

Scanned with OKEN Scanner

$$V = Qs \operatorname{cotg} \varphi$$

$$F_0(s) = \left[-\frac{F_1(s)}{s \cos^2 \varphi} + \mu p_i \, s \operatorname{tg} \varphi + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}(p_n s^2) \right] \operatorname{cotg} \varphi + E \alpha h s \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}s} \tag{2.120}$$

$$F_1(s) = (N_x \sin \varphi + Q \cos \varphi) \, s \cos \varphi$$

$$F_2(s) = (1 + \mu) \, \alpha h^3 s \, \frac{\mathrm{d}(\Delta T)}{\mathrm{d}s} \operatorname{cotg} \varphi$$

în care $T(s)$ este funcţia variaţiei temperaturii pe generatoare, $\Delta T(s)$ funcţia variaţiei temperaturii pe grosimea învelişului, α coeficientul de dilatare termică liniară, D rigiditatea la încovoiere a învelişului, definită prin relaţia (2.67), θ — unghiul de rotire al normalei la suprafaţa mediană a învelişului.

Integrarea ecuaţiilor diferenţiale (2.119) se reduce (aşa cum a arătat E. Meissner) la rezolvarea unei ecuaţii de tip Bessel de ordinul doi ale cărei soluţii pot fi exprimate cu ajutorul funcţiilor lui Hanckel de clasa întîi şi a doua, de argument complex [10], [11], [48]. Separînd în aceste funcţii partea reală şi imaginară se pot introduce noi funcţii, de argument real, mai comode pentru calculele numerice [40]. Acestea sînt:

$$X_3(\nu) = -\frac{2^{0,25} e^{\nu}}{\sqrt{\pi\nu}} \left[x_{12}(\nu) \cos\left(\nu - \frac{\pi}{8}\right) - y_{12}(\nu) \sin\left(\nu - \frac{\pi}{8}\right) \right]$$

$$Y_3(\nu) = -\frac{2^{0,25} e^{\nu}}{\sqrt{\pi\nu}} \left[y_{12}(\nu) \cos\left(\nu - \frac{\pi}{8}\right) + x_{12}(\nu) \sin\left(\nu - \frac{\pi}{8}\right) \right]$$

$$X_4(\nu) = -\frac{2^{0,25} e^{-\nu}}{\sqrt{\pi\nu}} \left[x_{22}(\nu) \cos\left(\nu - \frac{3\pi}{8}\right) - y_{22}(\nu) \sin\left(\nu - \frac{3\pi}{8}\right) \right]$$

$$Y_4(\nu) = -\frac{2^{0,25} e^{-\nu}}{\sqrt{\pi\nu}} \left[y_{22}(\nu) \cos\left(\nu - \frac{3\pi}{8}\right) - x_{22}(\nu) \sin\left(\nu - \frac{3\pi}{8}\right) \right]$$

$$X_5(\nu) = \frac{2^{0,75} e^{\nu}}{\nu\sqrt{\pi\nu}} \left[y_{13}(\nu) \cos\left(\nu - \frac{3\pi}{8}\right) + x_{13}(\nu) \sin\left(\nu - \frac{3\pi}{8}\right) \right]$$

$$Y_5(\nu) = \frac{2^{0,75} e^{\nu}}{\nu\sqrt{\pi\nu}} \left[-x_{13}(\nu) \cos\left(\nu - \frac{3\pi}{8}\right) + y_{13}(\nu) \sin\left(\nu - \frac{3\pi}{8}\right) \right] \tag{2.121}$$

Scanned with OKEN Scanner

$$X_5^*(\nu) = \frac{2^{0,75}e^{-\nu}}{\nu\sqrt{\pi\nu}}\left[-y_{23}(\nu)\cos\left(\nu-\frac{\pi}{8}\right)+x_{23}(\nu)\sin\left(\nu-\frac{\pi}{8}\right)\right]$$

$$Y_5^*(\nu) = \frac{2^{0,75}e^{-\nu}}{\nu\sqrt{\pi\nu}}\left[x_{23}(\nu)\cos\left(\nu-\frac{\pi}{8}\right)+y_{23}(\nu)\sin\left(\nu-\frac{\pi}{8}\right)\right]$$

în care

$$x_{12}(\nu) = 1 + \frac{0,9375}{\nu} + \frac{0,0769}{\nu^3} + \dots$$

$$y_{12}(\nu) = \frac{0,9375}{\nu} + \frac{0,4102}{\nu^2} - \frac{0,0769}{\nu^3} + \dots$$

$$x_{22}(\nu) = 1 - \frac{0,9375}{\nu} - \frac{0,0769}{\nu^3} - \dots$$

$$y_{22}(\nu) = -\frac{0,9375}{\nu} + \frac{0,4102}{\nu^2} + \frac{0,0769}{\nu^3} + \dots \qquad (2.122)$$

$$x_{13}(\nu) = 1 + \frac{2,1875}{\nu} - \frac{0,846}{\nu^3} + \frac{0,344}{\nu^4} - \dots$$

$$y_{13}(\nu) = \frac{2,1875}{\nu} + \frac{3,691}{\nu^2} + \frac{0,846}{\nu^3} + \dots$$

$$x_{23}(\nu) = 1 - \frac{2,1875}{\nu} + \frac{0,846}{\nu^3} + \frac{0,344}{\nu^4} - \dots$$

$$y_{23}(\nu) = -\frac{2,1875}{\nu} + \frac{3,691}{\nu^2} - \frac{0,8460}{\nu^3} + \dots$$

dezvoltări valabile pentru valori mari ale variabilei ν și anume pentru $\nu > 5$. Această restricție nu deranjează, deoarece în calculele inginerești, valori mai mici ale lui ν se întîlnesc foarte rar.

Se definește parametrul învelișului conic

$$m_1 = \sqrt{12(1-\mu^2)}\,\frac{\operatorname{tg}\varphi}{h} \qquad (2.123)$$

Scanned with OKEN Scanner

şi variabila adimensională

$$\nu = \sqrt{2m_1 s}. \tag{2.124}$$

Cu notaţiile de mai sus, soluţiile sistemului de ecuaţii diferenţiale (2.119) sînt

$$V = C_1 X_3 + C_2 X_4 + C_3 Y_3 + C_4 Y_4 + V^*$$

$$\theta = \frac{m_1}{Eh \operatorname{tg}\varphi}(C_3 X_3 + C_4 X_4 - C_1 Y_3 - C_2 Y_4) + \theta^* \tag{2.125}$$

în care C_1, C_2, C_3, C_4 sînt constante de integrare, iar V^* şi θ^* sînt soluţiile particulare ale sistemului de ecuaţii neomogene (2.119).

Intensităţile eforturilor sînt

$$M_x = -D\left(\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}s} + \mu\frac{\theta}{s}\right) + (1+\mu) D\alpha\Delta T$$

$$M_\psi = -D\left(\frac{\theta}{s} + \mu\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}s}\right) + (1+\mu) D\alpha\Delta T$$

$$Q = \frac{V}{s}\operatorname{tg}\varphi, \tag{2.126}$$

$$N_x = \frac{F_1(s)}{s\sin\varphi\cos\varphi} - \frac{V}{s}$$

$$N_\psi = p_n s \operatorname{cotg}\varphi - \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}s}$$

sau, avînd în vedere relaţiile (2.125):

$$M_x = -D\frac{m_1}{Eh\operatorname{tg}\varphi}\left\{C_3\left[(1+\mu)\frac{X_3}{s} + m_1 X_5\right] + \right.$$

$$+ C_4\left[(1+\mu)\frac{X_4}{s} + m_1 X_5^*\right] - C_1\left[(1+\mu)\frac{Y_3}{s} + m_1 Y_5\right] -$$

$$- C_2\left[(1+\mu)\frac{Y_4}{s} + m_1 Y_5^*\right]\Big\} - D\left(\frac{\mathrm{d}\theta^*}{\mathrm{d}s} + \mu\frac{\theta^*}{s}\right) +$$

$$+ (1+\mu)\, D\alpha\Delta T$$

$$M_\psi = -D\frac{m_1}{Eh\,\mathrm{tg}\varphi}\left\{C_3\left[(1+\mu)\frac{X_3}{s} + \mu m_1 X_5\right] +\right.$$

$$+ C_4\left[(1+\mu)\frac{X_4}{s} + \mu m_1 X_5^*\right] - C_1\left[(1+\mu)\frac{Y_3}{s} + \mu m_1 Y_5\right] -$$

$$\left. - C_2\left[(1+\mu)\frac{Y_4}{s} + \mu m_1 Y_5^*\right]\right\} - D\left(\frac{\theta^*}{s} + \mu\frac{\mathrm{d}\theta^*}{\mathrm{d}s}\right) +$$

$$+ (1+\mu)\, D\alpha\,\Delta T \qquad (2.126')$$

$$Q = \frac{\mathrm{tg}\,\varphi}{s}(C_1X_3 + C_2X_4 + C_3Y_3 + C_4Y_4) + \frac{\mathrm{tg}\,\varphi}{s}V^*$$

$$N_x = \frac{F_1(s)}{s\sin\varphi\cos\varphi} - \frac{V^*}{s} - \frac{1}{s}(C_1X_3 + C_2X_4 + C_3Y_3 + C_4Y_4)$$

$$N_\psi = p_n\, s\,\mathrm{cotg}\,\varphi - C_1\left(\frac{X_3}{s} + m_1X_5\right) - C_2\left(\frac{X_4}{s} + m_1X_5^*\right) -$$

$$- C_3\left(\frac{Y_3}{s} + m_1Y_5\right) - C_4\left(\frac{Y_4}{s} + m_1Y_5^*\right) - \frac{\mathrm{d}V^*}{\mathrm{d}s}.$$

La scrierea relaţiilor (2.126) s-a ţinut seamă de următoarele formule

$$\frac{\mathrm{d}X_3}{\mathrm{d}s} = \frac{X_3}{s} + m_1X_5; \qquad \frac{\mathrm{d}Y_3}{\mathrm{d}s} = \frac{Y_3}{s} + m_1Y_5, \qquad (2.127)$$

$$\frac{\mathrm{d}X_4}{\mathrm{d}s} = \frac{X_4}{s} + m_1X_5^*, \qquad \frac{\mathrm{d}Y_4}{\mathrm{d}s} = \frac{Y_4}{s} + m_1Y_5^*.$$

Scanned with OKEN Scanner

Pentru scrierea condiţiilor de continuitate la capetele învelişului, este necesar să se cunoască şi

— deplasarea radială

$$w = \left[\frac{s}{Eh}(N_\psi - \mu N_x) + s\alpha T\right]\cos\varphi, \qquad (2.128')$$

— intensitatea efortului radial (v. fig. 2.12)

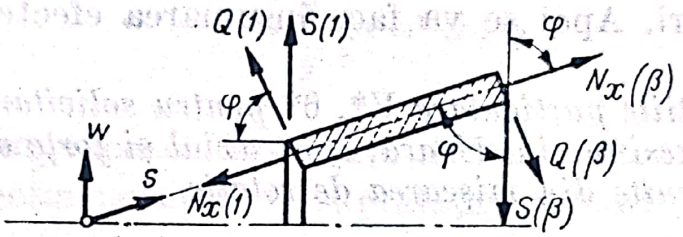


Fig. 2.12

$$S = Q\sin\varphi - N_x\cos\varphi. \qquad (2.128'')$$

În vederea simplificării scrierii expresiilor (2.126') şi (2.128'), s-au introdus notaţiile următoare, care se vor folosi în cele ce urmează :

$$\begin{aligned}
X_6(\nu,\mu) &= (1+\mu)\,X_3(\nu) + \mu\frac{\nu^2}{2}X_5(\nu)\\
X_7(\nu,\mu) &= (1+\mu)\,X_4(\nu) + \mu\frac{\nu^2}{2}X_5^*(\nu)\\
X_8(\nu,\mu) &= (1+\mu)\,Y_3(\nu) + \mu\frac{\nu^2}{2}Y_5(\nu)\\
X_9(\nu,\mu) &= (1+\mu)\,Y_4(\nu) + \mu\frac{\nu^2}{2}Y_5^*(\nu)\\
Y_6(\nu,\mu) &= (1+\mu)\,X_3(\nu) + \frac{\nu^2}{2}X_5(\nu)\\
Y_7(\nu,\mu) &= (1+\mu)\,X_4(\nu) + \frac{\nu^2}{2}X_5^*(\nu)
\end{aligned} \qquad (2.129)$$

$$Y_8(\nu, \mu) = (1 + \mu) Y_3(\nu) + \frac{\nu^2}{2} Y_5(\nu)$$

$$Y_9(\nu, \mu) = (1 + \mu) Y_4(\nu) + \frac{\nu^2}{2} Y_5^*(\nu).$$

Determinarea soluţiilor particulare V^*, θ^* ale sistemului de ecuaţii (2.119) se va face separat pentru solicitările termice şi pentru celelate solicitări. Apoi se va face însumarea efectelor.

2.5.2. *Soluţiile particulare V^*, θ^* pentru solicitarea cu presiune interioară, efort axial şi forţe de inerţie provenite din mişcarea de rotaţie*

Se consideră un înveliş conic solicitat cu o presiune interioară uniformă p, o forţă axială de întindere, a cărei rezultantă este P şi sarcinile masice provenite din mişcarea de rotaţie a învelişului faţă de axa sa, cu viteza unghiulară constantă ω.

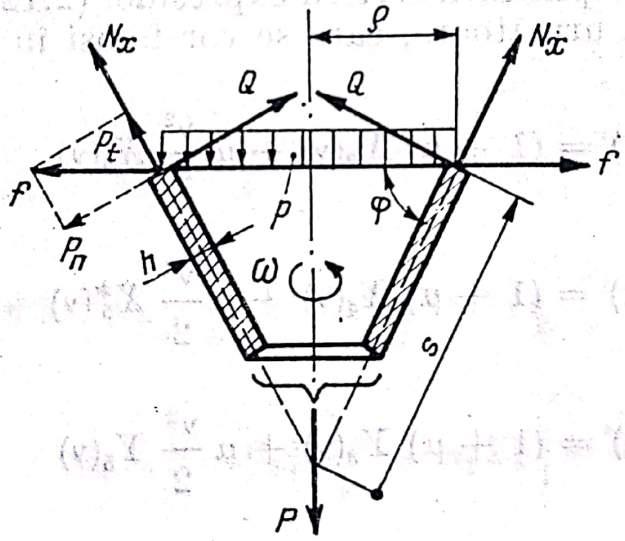


Fig. 2.13

Dacă se face o secţiune normală pe axa învelişului, ca în figura 2.13, ecuaţia de echilibru a forţelor pe direcţie axială se scrie sub forma

$$P + p\pi\rho^2 = 2\pi\rho(N_x \sin\varphi + Q\cos\varphi),$$

în care

$$\rho = s\cos\varphi,$$

este raza cercului paralel pentru abscisa s.

Scanned with OKEN Scanner

În aceste condiţii, rezultă că prima funcţie a sarcinii este (v relaţiile (2.120))

$$F_1(s) = \frac{P}{2\pi} + \frac{1}{2} ps^2 \cos^2\varphi. \qquad (2.130')$$

Sarcina masică radială provenită din mişcarea de rotaţie este

$$f = \frac{\gamma}{g} hs\, \omega^2 \cos\varphi$$

astfel încît, componentele sarcinii distribuite din înveliş sînt :

— pe direcţia normală la suprafaţa mediană

$$p_n = p + \frac{\gamma}{g} hs\, \omega^2 \cos\varphi \sin\varphi, \qquad (2.131')$$

— pe direcţia generatoarei

$$p_t = \frac{\gamma}{g} hs\, \omega^2 \cos^2\varphi. \qquad (2.131'')$$

Din cea de a treia relaţie (2.120) rezultă,

$$F_0(s) = \left[\frac{3}{2} ps + (3+\mu) \frac{\gamma}{g} hs^2 \omega^2 \cos\varphi \sin\varphi - \frac{P}{2\pi s \cos^2\varphi} \right] \operatorname{cotg}\varphi. \qquad (2.132')$$

Înlocuind această expresie în sistemul (2.119) şi observînd că cea de a doua funcţie a sarcinii $F_2(s)$ este nulă, se pot determina soluţiile particulare V^* şi θ^*.

S-au căutat soluţii de forma

$$V^* = c_1 s\,; \qquad \theta^* = c_2 s + c_3 s^2 + \frac{c_4}{s}.$$

În urma înlocuirilor în (2.119) se obţine

$$c_1 = 3(3+\mu) \frac{\gamma}{g} D \frac{\omega^2}{E} \cos^2\varphi \operatorname{cotg}^2\varphi$$

Scanned with OKEN Scanner

$$c_2 = -\frac{3}{2}\frac{p}{Eh}\operatorname{cotg}^2\varphi$$

$$c_3 = -(3+\mu)\frac{\gamma}{g}\frac{\omega^2}{E}\cos^2\varphi\operatorname{cotg}\varphi$$

$$c_4 = \frac{P}{2\pi Eh\sin^2\varphi}$$

astfel încît, în final, rezultă :

$$V^* = \frac{3+\mu}{4(1-\mu^2)}\cdot\frac{\gamma}{g}\omega^2 h^3 s\cos^2\varphi\operatorname{cotg}^2\varphi \tag{2.133}$$

$$\theta^* = -\frac{3}{2}\frac{ps}{Eh}\operatorname{cotg}^2\varphi - (3+\mu)\frac{\gamma}{g}\frac{\omega^2 s^2}{E}\cos^2\varphi\operatorname{cotg}\varphi + \\ + \frac{P}{2\pi Eh\, s\sin^2\varphi}\cdot$$

2.5.3. *Soluţiile particulare* V^*, θ^* *pentru solicitările termice*

Se consideră că învelişul suferă o încălzire cu un cîmp staţionar de temperatură, axial simetric, funcţia de temperatură în lungul generatoarei fiind $T(s)$. Pe grosimea învelişului se admite o variaţie liniară a temperaturii, diferenţa acesteia fiind ΔT între două puncte, situate unul pe suprafaţa interioară, celălalt pe suprafaţa exterioară a învelişului (punctele se află pe normala la suprafaţa mediană a învelişului).

În aceste condiţii :

$$F_1(s) = 0$$

$$F_2(s) = (1+\mu)\,h^3 s\alpha\frac{\mathrm{d}(\Delta T)}{\mathrm{d}s}\operatorname{cotg}\varphi \tag{2.130''}$$

Scanned with OKEN Scanner

$$F_0(s) = Ehs\alpha \frac{dT}{ds} \qquad (2.132'')$$

expresii care se înlocuiesc în sistemul (2.119), pentru a putea determina soluţiile particulare V^* şi θ^*.

Se vor considera funcţiile de temperatură sub forma

$$T = a_0 + a_n s^n$$

$$\Delta T = b_0 + b_n s^n,$$

şi soluţiile particulare corespunzătoare de forma

$$V^* = c_1 s^{c_2}$$

$$\theta^* = c_3 s^{c_4}$$

În urma înlocuirilor în (2.119) se obţine

$$c_2 = c_4 = n = 1$$

şi

$$c_2 = c_4 = n = -1$$

De asemenea rezultă

$$c_1 = (1 + \mu) \frac{D}{\operatorname{tg}\varphi} \alpha n b_n$$

$$c_3 = -\alpha n a_n \operatorname{cotg} \varphi.$$

Avînd în vedere aceste rezultate, înseamnă că pentru funcţiile de temperatură de forma

$$T(s) = a_0 + a_1 s + \frac{a_2}{s} \qquad (2.134)$$

$$\Delta T(s) = b_0 + b_1 s + \frac{b_2}{s}$$

Scanned with OKEN Scanner

se obțin soluțiile particulare

$$V^*(s) = \frac{1}{12(1-\mu)} Eh^3\alpha \left(b_1 s - \frac{b_2}{s}\right) \operatorname{cotg} \varphi$$

$$\theta^*(s) = -\alpha \left(a_1 s - \frac{a_2}{s}\right) \operatorname{cotg} \varphi. \tag{2.135}$$

2.5.4. *Expresiile eforturilor și deplasărilor pentru cazul general de solicitare*

Pentru cazul general de solicitare considerat, se însumează relațiile (2.133) și (2.135), obținîndu-se forma completă a soluțiilor particulare ale sistemului (2.119),

$$V^*(s) = \frac{3+\mu}{4(1-\mu^2)} \frac{\gamma}{g} \omega^2 h^3 s \cos^2 \varphi \operatorname{cotg}^2 \varphi + \\ + \frac{Eh^3\alpha}{12(1-\mu)} \left(b_1 s - \frac{b_2}{s}\right) \operatorname{cotg} \varphi$$

$$\theta^*(s) = -\frac{3}{2} \frac{ps}{Eh} \operatorname{cotg}^2 \varphi - (3+\mu) \frac{\gamma}{g} \frac{\omega^2 s^2}{E} \cos^2 \varphi \operatorname{cotg} \varphi + \\ + \frac{P}{2\pi Ehs \sin^2 \varphi} - \alpha \left(a_1 s - \frac{a_2}{s}\right) \operatorname{cotg} \varphi. \tag{2.136}$$

În mod asemănător se obțin și funcțiile sarcinilor :

$$F_0(s) = \left[\frac{3}{2} ps + (3+\mu) \frac{\gamma}{g} hs^2 \omega^2 \cos \varphi \sin \varphi - \right. \\ \left. - \frac{P}{2\pi s \cos^2 \varphi}\right] \operatorname{cotg} \varphi + Ehs\, \alpha \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}s} \tag{2.132}$$

prima și a doua funcție a sarcinilor, fiind respectiv (2.130′) și (2.130″).

Odată precizate aceste expresii, se pot determina eforturile și deplasările, cu relațiile (2.125), (2.126) și (2.128).

Scanned with OKEN Scanner

În vederea simplificării calculelor, în locul abscisei s se introduce abscisa adimensională

$$\xi = \frac{s}{s_r}$$

și

$$\beta = \frac{s_r}{s_R} = \frac{R}{r} \tag{2.137}$$

în care s_r, s_R, r, R sînt notate pe figura 2.11, a. Rezultă că pentru circumferința mică a învelișului $\xi = 1$, iar pentru cea mare $\xi = \beta$.

De asemenea variabila ν dată de (2.124) este

$$\nu = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,\frac{\sin\varphi}{\cos^2\varphi}\,\frac{R}{h}\,\frac{\xi}{\beta}, \tag{2.138'}$$

care la capetele învelișului are valorile:

— pentru circumferința mică ($\xi = 1$)

$$\nu_1 = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,\frac{\sin\varphi}{\cos^2\varphi}\,\frac{R}{h}\,\frac{1}{\beta}; \tag{2.138''}$$

— pentru circumferința mare ($\xi = \beta$)

$$\nu_\beta = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,\frac{\sin\varphi}{\cos^2\varphi}\,\frac{R}{h}. \tag{2.138'''}$$

Pentru simplificarea scrierii expresiilor eforturilor și deplasărilor, termenii care nu conțin constantele de integrare se calculează separat. Dacă se au în vedere notațiile (2.137) și consecințele ce decurg din acestea se obține:

$$V^*(\xi) = \frac{\operatorname{cotg}\varphi}{4(1-\mu)}\left[\frac{3+\mu}{1+\mu}\cdot\frac{\gamma R^2\omega^2}{gE}\,\frac{h}{R}\,\frac{\xi}{\beta}\cos\varphi\operatorname{cotg}\varphi + \right. \tag{2.139}$$

$$\left. + \frac{\alpha}{3}\left(\xi\bar{b}_1 - \frac{\bar{b}_2}{\xi}\right)\right] Eh^2$$

$$\theta^*(\xi) = \left[\left(\frac{P\beta}{2\pi R\,Eh\xi} - \frac{3pR\xi}{2Eh\beta}\right)\frac{1}{\sin\varphi} - (3+\mu)\frac{\gamma R^2\omega^2\xi^2}{gE\beta^2} - \right.$$

$$\left. - \alpha\left(\bar{a}_1\xi - \frac{\bar{a}_2}{\xi}\right)\right]\operatorname{cotg}\varphi$$

$$M_x^*(s) = -D\left(\frac{\mathrm{d}\theta^*}{\mathrm{d}s} + \mu\frac{\theta^*}{s}\right) + (1+\mu)\,D\alpha\Delta T(s)$$

$$M_x^*(\xi) = \frac{\cos\varphi\operatorname{cotg}\varphi}{12(1+\mu)}\frac{h}{R}\beta Eh^2\left[\left(\frac{P\beta}{2\pi R\,Eh\xi^2} + 3\frac{1+\mu}{1-\mu}\cdot\frac{pR}{2Eh\beta}\right)\frac{1}{\sin\varphi} + \right.$$

$$\left. + \frac{(2+\mu)(3+\mu)}{1-\mu}\cdot\frac{\gamma R^2\omega^2\xi}{gE\beta^2} + \alpha\left(\frac{1+\mu}{1-\mu}\bar{a}_1 + \frac{\bar{a}_2}{\xi^2}\right)\right] + \frac{Eh^2\alpha}{12(1-\mu)}\Delta T(\xi)$$

$$M_\psi^*(s) = -D\left(\frac{\theta^*}{s} + \mu\frac{\mathrm{d}\theta^*}{\mathrm{d}s}\right) + (1+\mu)\,D\alpha\Delta T(s) \qquad (2.139)$$

$$M_\psi^*(\xi) = -\frac{\cos\varphi\operatorname{cotg}\varphi}{12(1+\mu)}\frac{h}{R}\beta Eh^2\left[\left(\frac{P\beta}{2\pi R\,Eh\xi^2} - 3\frac{1+\mu}{1-\mu}\frac{pR}{2Eh\beta}\right)\frac{1}{\sin\varphi} - \right.$$

$$\left. - \frac{(1+2\mu)(3+\mu)}{1-\mu}\cdot\frac{\gamma R^2\omega^2\xi}{gE\beta^2} - \alpha\left(\frac{1+\mu}{1-\mu}\bar{a}_1 - \frac{\bar{a}_2}{\xi^2}\right)\right] + \frac{Eh^2\alpha}{12(1-\mu)}\Delta T(\xi)$$

$$N_x^*(s) = \frac{F_1(s)}{s\sin\varphi\cos\varphi} - \frac{V^*(s)}{s}$$

$$N_x^*(\xi) = \frac{\beta}{R\xi}\left[\frac{F_1(\xi)}{\sin\varphi} - V^*(\xi)\cos\varphi\right]$$

$$N_\psi^*(s) = p_n s\operatorname{cotg}\varphi - \frac{\mathrm{d}V^*}{\mathrm{d}s}$$

$$N_\psi^*(\xi) = Eh\left\{\frac{\xi}{\beta\sin\varphi}\left(\frac{\gamma R^2\omega^2\xi}{gE\beta}\sin\varphi + \frac{pR}{Eh}\right) - \right.$$

Scanned with OKEN Scanner

$$-\frac{\cos\varphi\,\mathrm{cotg}\varphi}{4(1-\mu)}\frac{h}{R}\beta\left[\frac{3+\mu}{1+\mu}\cdot\frac{\gamma R^2\omega^2}{gE\beta}\frac{h}{R}\cos\varphi\,\mathrm{cotg}\varphi+\frac{\alpha}{3}\left(\bar{b}_1+\frac{\bar{b}_2}{\xi^2}\right)\right]\Bigg\}$$

$$w^*(s)=s\left\{\frac{1}{Eh}\left[N^*_\psi(s)-\mu N^*_x(s)\right]+\alpha T(s)\right\}\cos\varphi$$

$$w^*(s)=R\left\{\left[(1-\mu)\frac{pR\xi^2}{\beta^2 Eh}-\frac{\mu P}{2\pi R Eh}\right]\frac{1}{\sin\varphi}+\right.$$

$$+\frac{\gamma R^2\omega^2\xi^3}{gE\beta^3}\left[1-\frac{3+\mu}{4(1+\mu)}\left(\frac{h}{R}\frac{\beta}{\xi}\cos\varphi\,\mathrm{cotg}\varphi\right)^2\right]- \qquad (2.139)$$

$$\left.-\frac{\alpha}{12}\frac{h}{R}\cos\varphi\,\mathrm{cotg}\varphi\left(\bar{b}_1\xi+\frac{1+\mu}{1-\mu}\frac{\bar{b}_2}{\xi}\right)+\frac{\alpha\xi}{\beta}\,T(\xi)\right\}$$

$$S^*(s)=\frac{V^*(s)}{s}\,\mathrm{tg}\,\varphi\sin\varphi-N^*_x(s)\cos\varphi$$

$$S^*(\xi)=Eh\frac{\beta}{\xi}\left\{\frac{\mathrm{cotg}\,\varphi}{4(1-\mu)}\frac{h}{R}\left[\frac{3+\mu}{1+\mu}\frac{\gamma R^2\omega^2}{gE}\cdot\frac{h}{R}\frac{\xi}{\beta}\cos\varphi\,\mathrm{cotg}\varphi+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\frac{\alpha}{3}\left(\xi\bar{b}_1-\frac{\bar{b}_2}{\xi}\right)\right]-\left(\frac{P}{2\pi REh}+\frac{pR\xi^2}{2Eh\beta^2}\right)\mathrm{cotg}\,\varphi\right\}.$$

În relaţiile de mai sus funcţiile de temperatură (2.134) s-au scris în raport de abscisa adimensională ξ, adică

$$T(\xi)=\bar{a}_0+\bar{a}_1\xi+\frac{\bar{a}_2}{\xi}$$

(2.140)

$$\Delta T(\xi)=\bar{b}_0+\bar{b}_1\,\xi+\frac{\bar{b}_2}{\xi}$$

Scanned with OKEN Scanner

în care

$$\bar{a}_0 = a_0\,;\quad \bar{a}_1 = a_1 s_r\,;\quad \bar{a}_2 = \frac{a_2}{s_r}$$

$$\bar{b}_0 = b_0 h\,;\quad \bar{b}_1 = b_1 h s_r\,;\quad \bar{b}_2 = \frac{b_2 h}{s_r}. \tag{2.141}$$

Cu notațiile (2.129), (2.139) și (2.140), din relațiile (2.125), (2.126) și (2.128) se obțin expresiile intensităților eforturilor și expresiile deplasărilor, într-un punct de abscisă ξ al învelișului :

$$w(\xi) = -\frac{\cos\varphi}{Eh}\,[C_1 Y_6(\xi) + C_2 Y_7(\xi) + C_3 Y_8(\xi) + C_4 Y_9(\xi)] + w^*(\xi)$$

$$\theta(\xi) = 2\sqrt{3(1-\mu^2)}\,\frac{1}{Eh^2}\,[-C_1 Y_3(\xi) - C_2 Y_4(\xi) + C_3 X_3(\xi) + C_4 X_4(\xi)] + \theta^*(\xi)$$

$$M_x(\xi) = \frac{1}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\cdot\frac{h\beta\cos\varphi}{\xi R}\,[C_1 Y_8(\xi) + C_2 Y_9(\xi) - C_3 Y_6(\xi) - C_4 Y_7(\xi)] + M_x^*(\xi)$$

$$S(\xi) = \frac{\beta}{\xi R}\,[C_1 X_3(\xi) + C_2 X_4(\xi) + C_3 Y_3(\xi) + C_4 Y_4(\xi)] + S^*(\xi) \tag{2.142}$$

$$M_\psi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\,\frac{h\beta\cos\varphi}{\xi R}\,[C_1 X_8(\xi) + C_2 X_9(\xi) - C_3 X_6(\xi) - C_4 X_7(\xi)] + M_\psi^*(\xi)$$

$$N_x(\xi) = N_x^*(\xi) - \frac{\beta\cos\varphi}{\xi R}\,[C_1 X_3(\xi) + C_2 X_4(\xi) + C_3 Y_3(\xi) + C_4 Y_4(\xi)]$$

$$N_\psi(\xi) = N_\psi^*(\xi) - \frac{\beta\cos\varphi}{\xi R}\,[C_1 Y_6(\xi) + C_2 Y_7(\xi) + C_3 Y_8(\xi) + C_4 Y_9(\xi)].$$

Scanned with OKEN Scanner

Cu ajutorul acestor relaţii se pot exprima eforturile şi deplasările la capetele învelişului, în vederea scrierii condiţiilor de continuitate. După determinarea constantelor de integrare, cu expresiile intensităţilor eforturilor de întindere şi încovoiere se pot afla tensiunile în orice punct al învelişului.

Observaţie. În relaţiile (2.142) funcţiile X_i, Y_i s-au scris ca avînd argumentul ξ. În realitate ele sînt funcţii de argumentul ν, definit prin relaţia (2.124) şi exprimat funcţie de ξ prin relaţia (2.138′). În cele ce urmează se va nota $X_i(1)$, $Y_i(1)$, $X_i(\beta)$, $Y_i(\beta)$, înţelegînd prin aceasta de fapt $X_i(\nu_1)$, $Y_i(\nu_1)$, $X_i(\nu_\beta)$, $Y_i(\nu_\beta)$, în care ν_1 şi ν_β sînt valorile argumentelor la capetele învelişului, obţinute cu relaţiile (2.138″) şi (2.138‴) pentru $\xi = 1$, respectiv $\xi = \beta$.

Pentru învelişul conic considerat se pot ivi trei cazuri distincte de scriere a condiţiilor de continuitate şi a condiţiilor la limită şi anume :

1°. **Înveliş cu ambele contururi de legătură.** În acest caz, se vor înlocui în primele patru din relaţiile (2.142) valorile abscisei adimensionale ξ corespunzătoare celor două contururi de legătură ale învelişului şi anume :

— $\xi = 1$ pentru conturul de diametru mic (conturul din stînga)

— $\xi = \beta$ pentru conturul de diametru mare (conturul din dreapta).

2°. **Înveliş cu conturul de diametru mic ($\xi = 1$) de legătură şi conturul de diametru mare** ($\xi = \beta$) **liber.** Dacă marginea de diametru mare este liberă, trebuie ca

$$M_x(\beta) = 0\,; \qquad S(\beta) = 0.$$

Din a treia şi a patra relaţie (2.142) rezultă

$$C_1 Y_8(\beta) + C_2 Y_9(\beta) - C_3 Y_6(\beta) - C_4 Y_7(\beta) = -\sqrt{12(1-\mu^2)}\,\frac{R}{h\cos\varphi}\,M_x^*(\beta)$$

$$C_1 X_3(\beta) + C_2 X_4(\beta) + C_3 Y_3(\beta) + C_4 Y_4(\beta) = -RS^*(\beta). \tag{2.143}$$

Din acest sistem de ecuaţii se scot constantele de integrare C_3 şi C_4 funcţie de constantele C_1 şi C_2.

Se obţine

$$C_3 = C_1 z_1(\beta,\mu) + C_2 z_2(\beta,\mu) + z_6(\beta,\mu)\,\frac{R}{h\cos\varphi}\,M_x^*(\beta) + z_8(\beta,\mu)\,RS^*(\beta)$$

$$C_4 = -C_1 z_3(\beta,\mu) - C_2 z_4(\beta,\mu) - z_5(\beta,\mu)\,\frac{R}{h\cos\varphi}\,M_x^*(\beta) - z_7(\beta,\mu)\,RS^*(\beta) \tag{2.144}$$

Scanned with OKEN Scanner

în care s-au notat

$$z_1(\xi,\mu)=\frac{1}{z_9(\xi,\mu)}\left[X_3(\xi)Y_7(\xi,\mu)+Y_4(\xi)\,Y_8(\xi,\mu)\right]$$

$$z_2(\xi,\mu)=\frac{1}{z_9(\xi,\mu)}\left[X_4(\xi)\,Y_7(\xi,\mu)+Y_4(\xi)\,Y_9(\xi,\mu)\right]$$

$$z_3(\xi,\mu)=\frac{1}{z_9(\xi,\mu)}\left[X_3(\xi)\,Y_6(\xi,\mu)+Y_3(\xi)\,Y_8(\xi,\mu)\right]$$

$$z_4(\xi,\mu)=\frac{1}{z_9(\xi,\mu)}\left[X_4(\xi)Y_6(\xi,\mu)+Y_3(\xi)\,Y_9(\xi,\mu)\right]$$

$$z_5(\xi,\mu)=\sqrt{12(1-\mu^2)}\,\frac{Y_3(\xi)}{z_9(\xi,\mu)}$$

$$z_6(\xi,\mu)=\sqrt{12(1-\mu^2)}\,\frac{Y_4(\xi)}{z_9(\xi,\mu)} \qquad (2.145)$$

$$z_7(\xi,\mu)=\frac{Y_6(\xi,\mu)}{z_9(\xi,\mu)}$$

$$z_8(\xi,\mu)=\frac{Y_7(\xi,\mu)}{z_9(\xi,\mu)}$$

$$z_9(\xi,\mu)=Y_4(\xi)\;Y_6(\xi,\mu)-Y_3(\xi)\,Y_7(\xi,\mu).$$

Dacă în primele patru din relațiile (2.142) se face $\xi=1$ și se înlocuiesc constantele C_3 și C_4 cu formulele (2.144) se obțin expresiile deplasărilor și eforturilor de legătură:

$$w(1)=\frac{\cos\varphi}{Eh}\{C_1[Y_9(1,\mu)\,z_3(\beta,\mu)-Y_8(1,\mu)\,z_1(\beta,\mu)-Y_6(1,\mu)]+$$

$$+C_2[Y_9(1,\mu)\,z_4(\beta,\mu)-Y_8(1,\mu)\,z_2(\beta,\mu)-Y_7(1,\mu)]\}+$$

Scanned with OKEN Scanner

$$+\frac{M_x^*(\beta)R}{Eh^2}[Y_9(1,\mu)z_5(\beta,\mu)-Y_8(1,\mu)z_6(\beta,\mu)]+$$

$$+\frac{S^*(\beta)R\cos\varphi}{Eh}[Y_9(1,\mu)z_7(\beta,\mu)-Y_8(1,\mu)z_8(\beta,\mu)]+w^*(1)$$

$$\theta(1)=2\sqrt{3(1-\mu^2)}\left\{\frac{C_1}{Eh^2}[X_3(1)z_1(\beta,\mu)-X_4(1)z_3(\beta,\mu)-Y_3(1)]+\right.$$

$$+\frac{C_2}{Eh^2}[X_3(1)z_2(\beta,\mu)-X_4(1)z_4(\beta,\mu)-Y_4(1)]+$$

$$+\frac{M^*(\beta)R}{Eh^3\cos\varphi}[X_3(1)z_6(\beta,\mu)-X_4(1)z_5(\beta,\mu)]+ \qquad (2.146)$$

$$\left.+\frac{S^*(\beta)R}{Eh^2}[X_3(1)z_8(\beta,\mu)-X_4(1)z_7(\beta,\mu)]\right\}+\theta^*(1)$$

$$M_x(1)=\frac{\beta}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\left\{\frac{C_1h}{R}\cos\varphi[Y_7(1,\mu)z_3(\beta,\mu)-Y_6(1,\mu)z_1(\beta,\mu)+\right.$$

$$+Y_8(1,\mu)]+\frac{C_2h}{R}\cos\varphi[Y_7(1,\mu)z_4(\beta,\mu)-Y_6(1,\mu)z_2(\beta,\mu)+Y_9(1,\mu)]+$$

$$+M_x^*(\beta)[Y_7(1,\mu)z_5(\beta,\mu)-Y_6(1,\mu)z_6(\beta,\mu)]+$$

$$\left.+S^*(\beta)h\cos\varphi[Y_7(1,\mu)z_7(\beta,\mu)-Y_6(1,\mu)z_8(\beta,\mu)]\right\}+M_x^*(1)$$

$$S(1)=\frac{C_1\beta}{R}[X_3(1)+Y_3(1)z_1(\beta,\mu)-Y_4(1)z_3(\beta,\mu)]+$$

$$+\frac{C_2\beta}{R}[X_4(1)+Y_3(1)z_2(\beta,\mu)-Y_4(1)z_4(\beta,\mu)]+$$

$$+\frac{M_x^*(\beta)\cdot\beta}{h\cos\varphi}[Y_3(1)z_6(\beta,\mu)-Y_4(1)z_5(\beta,\mu)]+S^*(\beta)\beta[Y_3(1)z_8(\beta,\mu)-$$

$$-Y_4(1)z_7(\beta,\mu)]+S^*(1).$$

Scanned with OKEN Scanner

3°. **Înveliș cu conturul de diametru mic** ($\xi = 1$) **liber și conturul de diametru mare** ($\xi = \beta$) **de legătură.** Se procedează ca la punctul 2.5.4.2. Pentru marginea liberă trebuie ca

$$M_x(1) = 0, \qquad S(1) = 0.$$

Din a treia și a patra relație (2.142) rezultă

$$C_1 Y_8(1) + C_2 Y_9(1) - C_3 Y_6(1) - C_4 Y_7(1) = -\sqrt{12(1-\mu^2)}\,\frac{R}{h\beta\cos\varphi}\,M_x^*(1) \tag{2.147}$$

$$C_1 X_3(1) + C_2 X_4(1) + C_3 Y_3(1) + C_4 Y_4(1) = -\frac{R}{\beta}\,S^*(1).$$

Expresiile constantelor C_3 și C_4 funcție de C_1 și C_2 sînt

$$C_3 = C_1 z_1(1,\mu) + C_2 z_2(1,\mu) + z_6(1,\mu)\,\frac{R}{h\beta\cos\varphi}\,M_x^*(1) + z_8(1,\mu)\,\frac{R}{\beta}\,S^*(1) \tag{2.148}$$

$$C_4 = -C_1 z_3(1,\mu) - C_2 z_4(1,\mu) - z_5(1,\mu)\,\frac{R}{h\beta\cos\varphi}\,M_x^*(1) - z_7(1,\mu)\,\frac{R}{\beta}\,S^*(1).$$

Dacă în primele patru din relațiile (2.142) se face $\xi = \beta$ și se înlocuiesc constantele C_3 și C_4 cu formulele (2.148), se obțin expresiile deplasărilor și eforturilor de legătură, expresii similare cu (2.146), găsite pentru învelișul care avea liber conturul corespunzător valorii $\xi = \beta$.

2.6. Învelișul sferic cu două margini

2.6.1. *Formule și notații de bază* [34], [40]

Ecuațiile diferențiale, scrise funcție de variabilele θ și V, pentru învelișul sferic de grosime constantă cu o solicitare axial simetrică, sînt

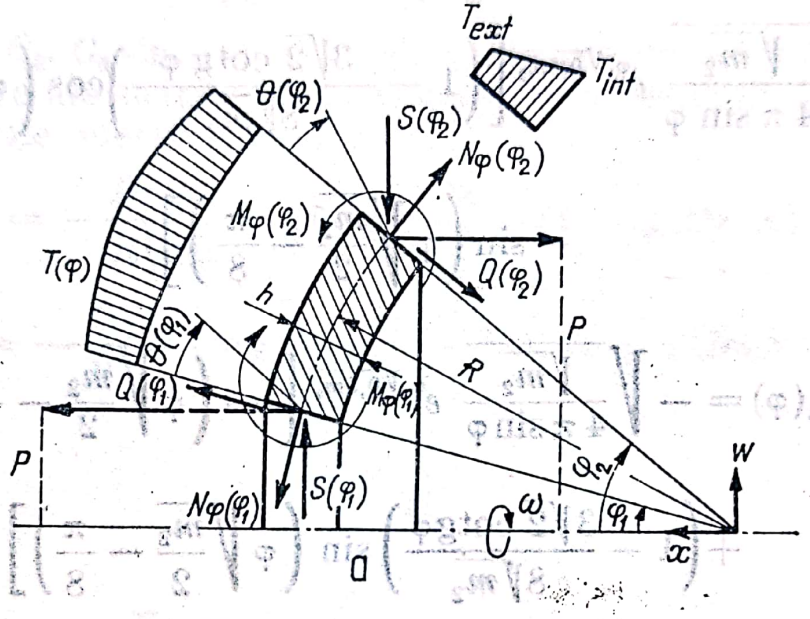
$$L_2(V) + \mu V = EhR\theta + F_0(\varphi) \tag{2.149}$$

$$L_2(\theta) - \mu\theta = -\frac{R}{D}\,V + F_2(\varphi)\,\frac{R}{h^3}$$

în care s-au folosit notaţiile din figura 2.14 şi :

$$L_2(*) = \frac{\mathrm{d}^2(*)}{\mathrm{d}\varphi^2} + \frac{\mathrm{d}(*)}{\mathrm{d}\varphi}\operatorname{cotg}\varphi - (*)\operatorname{cotg}^2\varphi$$

$$V = QR \tag{2.150}$$



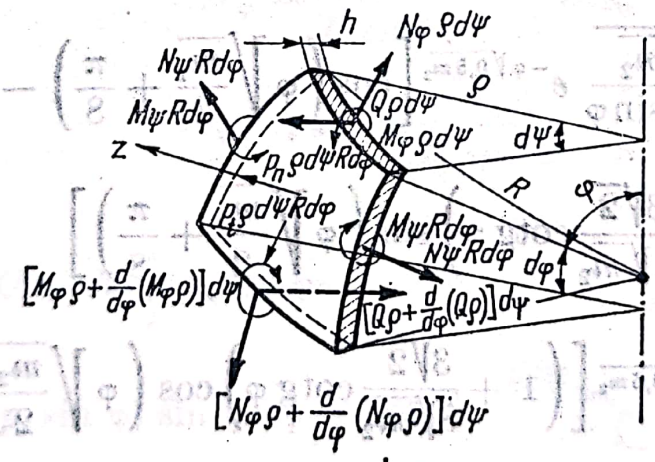


Fig. 2.14

$$F_0(\varphi) = (1+\mu)R^2 p_t + R^2\frac{\mathrm{d}(p_n)}{\mathrm{d}\varphi} + EhR\alpha\frac{dT}{\mathrm{d}\varphi}$$

$$F_2(\varphi) = (1+\mu)\,h^3\alpha\,\frac{\mathrm{d}(\Delta T)}{\mathrm{d}\varphi} \tag{2.150}$$

Scanned with OKEN Scanner

iar notaţiile T, ΔT, α, D, θ au aceleaşi semnificaţii ca la învelişul conic, § 2.5.

Integralele sistemului de ecuaţii diferenţiale (2.149) se pot scrie cu ajutorul funcţiilor lui Legendre. Pentru calculele numerice se utilizează funcţiile următoare, obţinute prin transformări ale funcţiilor lui Legendre [40], valabile pentru valori nu prea mici ale argumentului φ:

$$X_1(\varphi)=\sqrt{\frac{\sqrt{m_2}}{4\pi\sin\varphi}}\,e^{\varphi\sqrt{0{,}5m_2}}\left[\left(1-\frac{3\sqrt{2}\,\operatorname{cotg}\varphi}{8\sqrt{m_2}}\right)\cos\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}}-\frac{\pi}{8}\right)-\right.$$

$$\left.-\sin\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}}-\frac{\pi}{8}\right)\right]$$

$$Y_1(\varphi)=-\sqrt{\frac{\sqrt{m_2}}{4\pi\sin\varphi}}\,e^{\varphi\sqrt{0{,}5m_2}}\left[\cos\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}}-\frac{\pi}{8}\right)+\right.$$

$$\left.+\left(1-\frac{3\sqrt{2}\,\operatorname{cotg}\varphi}{8\sqrt{m_2}}\right)\sin\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}}-\frac{\pi}{8}\right)\right] \qquad (2.151)$$

$$X_2(\varphi)=\sqrt{\frac{\sqrt{m_2}}{\pi\sin\varphi}}\,e^{-\varphi\sqrt{0{,}5m_2}}\left[\cos\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}}+\frac{\pi}{8}\right)-\right.$$

$$\left.-\left(1+\frac{3\sqrt{2}}{8\sqrt{m_2}}\operatorname{cotg}\varphi\right)\sin\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}}+\frac{\pi}{8}\right)\right]$$

$$Y_2(\varphi)=\sqrt{\frac{\sqrt{m_2}}{\pi\sin\varphi}}\,e^{-\varphi\sqrt{0{,}5m_2}}\left[\left(1+\frac{3\sqrt{2}}{8\sqrt{m_2}}\operatorname{cotg}\varphi\right)\cos\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}}+\frac{\pi}{8}\right)+\right.$$

$$\left.+\sin\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}}+\frac{\pi}{8}\right)\right].$$

În expresiile funcţiilor (2.151) s-a folosit notaţia

$$m_2=\sqrt{12\,(1-\mu^2)\left(\frac{R}{h}\right)^2-\mu^2} \qquad (2.152)$$

pentru parametrul învelişului sferic.

Scanned with OKEN Scanner

Cu notaţiile de mai sus soluţiile sistemului de ecuaţii diferenţiale (2.149) sînt

$$V = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3Y_1 + C_4Y_2 + V^*$$

$$\theta = \frac{1}{EhR}[C_1(\mu X_1 - m_2Y_1) + C_2(\mu X_2 - m_2Y_2) + C_3(\mu Y_1 + m_2X_1) + C_4(\mu Y_2 + m_2X_2)] + \theta^*$$

în care C_1, C_2, C_3, C_4 sînt constante de integrare, iar V^* şi θ^* sînt soluţiile particulare ale sistemului de ecuaţii neomogene (2.149).

Intensităţile eforturilor sînt

$$M_\varphi = -\frac{D}{R}\left(\frac{d\theta}{d\varphi} + \mu\theta \operatorname{cotg}\varphi\right) + (1+\mu)D\alpha\,\Delta T$$

$$M_\psi = -\frac{D}{R}\left(\theta \operatorname{cotg}\varphi + \mu\frac{d\theta}{d\varphi}\right) + (1+\mu)D\alpha\Delta T$$

$$Q = \frac{V}{R} \qquad (2.154)$$

$$N_\varphi = \frac{F_1(\varphi)}{R\sin^2\varphi} - \frac{V}{R}\operatorname{cotg}\varphi$$

$$N_\psi = p_n R - \frac{F_1(\varphi)}{R\sin^2\varphi} - \frac{1}{R}\frac{dV}{d\varphi}$$

în care

$$F_1 = C + R^2\int(p_n\cos\varphi - p_t\sin\varphi)\sin\varphi\,d\varphi \qquad (2.155)$$

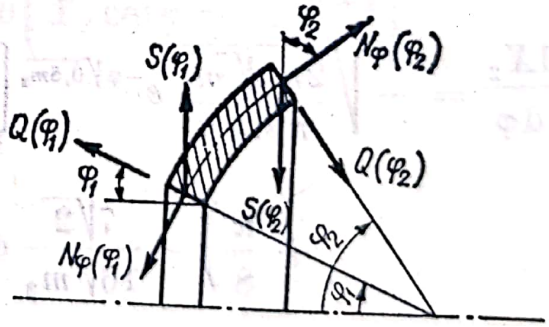


Fig. 2.15

este prima funcţie a sarcinii. Aceasta se determină scriind ecuaţia de echilibru a unei părţi a învelişului, obţinută prin secţionarea acestuia cu un plan normal pe axă. Constanta C corespunde aplicării forţelor concentrate, care dau componente axiale.

Pentru scrierea condiţiilor de continuitate la marginile învelişului, este necesar să se cunoască şi

— deplasarea radială

Scanned with OKEN Scanner

$$w = \left[\frac{1}{Eh}(N_\psi - \mu N_\varphi) + \alpha T\right] R \sin\varphi, \qquad (2.156')$$

— intensitatea efortului radial (v. fig. 2.15)

$$S = Q \sin\varphi - N_\varphi \cos\varphi. \qquad (2.156'')$$

Avînd precizate soluţiile (2.153) ale sistemului de ecuaţii diferenţiale, se pot stabili relaţiile de calcul ale deplasărilor şi ale intensităţilor eforturilor, înlocuind (2.153) în (2.154) şi în (2.156). Pentru aceasta se va avea în vedere că derivatele funcţiilor (2.151) sînt

$$\frac{dX_1}{d\varphi} = -\sqrt{\frac{m_2\sqrt{m_2}}{2\pi\sin\varphi}}\, e^{\varphi\sqrt{0{,}5m_2}}\left[\frac{7\sqrt{2}}{16\sqrt{m_2}}\operatorname{ctg}\varphi\cos\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}} - \frac{\pi}{8}\right) + \right.$$

$$\left. + \left(1 - \frac{7\sqrt{2}}{16\sqrt{m_2}}\operatorname{ctg}\varphi\right)\sin\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}} - \frac{\pi}{8}\right)\right]$$

$$\frac{dY_1}{d\varphi} = -\sqrt{\frac{m_2\sqrt{m_2}}{2\pi\sin\varphi}}\, e^{\varphi\sqrt{0{,}5m_2}}\left[\left(1 - \frac{7\sqrt{2}}{16\sqrt{m_2}}\right)\operatorname{ctg}\varphi\cos\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \frac{\pi}{8}\right) - \frac{7\sqrt{2}}{16\sqrt{m_2}}\operatorname{ctg}\varphi\sin\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}} - \frac{\pi}{8}\right)\right] \qquad (2.157)$$

$$\frac{dX_2}{d\varphi} = -\sqrt{\frac{2m_2\sqrt{m_2}}{\pi\sin\varphi}}\, e^{-\varphi\sqrt{0{,}5m_2}}\left[\left(1 + \frac{7\sqrt{2}}{16\sqrt{m_2}}\operatorname{ctg}\varphi\right)\cos\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \frac{\pi}{8}\right) - \frac{7\sqrt{2}}{16\sqrt{m_2}}\operatorname{ctg}\varphi\sin\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}} + \frac{\pi}{8}\right)\right]$$

$$\frac{dY_2}{d\varphi} = -\sqrt{\frac{2m_2\sqrt{m_2}}{\pi\sin\varphi}}\, e^{-\varphi\sqrt{0{,}5m_2}}\left[\frac{7\sqrt{2}}{16\sqrt{m_2}}\operatorname{ctg}\varphi\cos\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}} + \frac{\pi}{8}\right) + \right.$$

$$\left. + \left(1 + \frac{7\sqrt{2}}{16\sqrt{m_2}}\operatorname{ctg}\varphi\right)\sin\left(\varphi\sqrt{\frac{m_2}{2}} + \frac{\pi}{8}\right)\right]$$

Scanned with OKEN Scanner

De asemenea se fac următoarele notații

$$X_{11}(\varphi) = m_2\left(\frac{dY_1}{d\varphi} + \mu Y_1 \operatorname{cotg}\varphi\right) - \mu\left(\frac{dX_1}{d\varphi} + \mu X_1 \operatorname{cotg}\varphi\right)$$

$$X_{12}(\varphi) = m_2\left(\frac{dY_2}{d\varphi} + \mu Y_2 \operatorname{cotg}\varphi\right) - \mu\left(\frac{dX_2}{d\varphi} + \mu X_2 \operatorname{cotg}\varphi\right)$$

$$X_{13}(\varphi) = m_2\left(\frac{dX_1}{d\varphi} + \mu X_1 \operatorname{cotg}\varphi\right) + \mu\left(\frac{dY_1}{d\varphi} + \mu Y_1 \operatorname{cotg}\varphi\right)$$

$$X_{14}(\varphi) = m_2\left(\frac{dX_2}{d\varphi} + \mu X_2 \operatorname{cotg}\varphi\right) + \mu\left(\frac{dY_2}{d\varphi} + \mu Y_2 \operatorname{cotg}\varphi\right)$$

$$Y_{11}(\varphi) = m_2\left(Y_1 \operatorname{cotg}\varphi + \mu\frac{dY_1}{d\varphi}\right) - \mu\left(X_1 \operatorname{cotg}\varphi + \mu\frac{dX_1}{d\varphi}\right)$$

$$Y_{12}(\varphi) = m_2\left(Y_2 \operatorname{cotg}\varphi + \mu\frac{dY_2}{d\varphi}\right) - \mu\left(X_2 \operatorname{cotg}\varphi + \mu\frac{dX_2}{d\varphi}\right) \quad (2.158)$$

$$Y_{13}(\varphi) = m_2\left(X_1 \operatorname{cotg}\varphi + \mu\frac{dX_1}{d\varphi}\right) + \mu\left(Y_1 \operatorname{cotg}\varphi + \mu\frac{dY_1}{d\varphi}\right)$$

$$Y_{14}(\varphi) = m_2\left(X_2 \operatorname{cotg}\varphi + \mu\frac{dX_2}{d\varphi}\right) + \mu\left(Y_2 \operatorname{cotg}\varphi + \mu\frac{dY_2}{d\varphi}\right)$$

$$X_{15}(\varphi) = \mu X_1(\varphi) - m_2 Y_1(\varphi)$$

$$X_{16}(\varphi) = \mu X_2(\varphi) - m_2 Y_2(\varphi)$$

$$Y_{15}(\varphi) = \mu Y_1(\varphi) + m_2 X_1(\varphi)$$

$$Y_{16}(\varphi) = \mu Y_2(\varphi) + m_2 X_2(\varphi)$$

$$X_{17}(\varphi) = X_1 \mu \cos\varphi - \frac{dX_1}{d\varphi}\sin\varphi$$

Scanned with OKEN Scanner

$$X_{18}(\varphi) = X_2 \mu \cos\varphi - \frac{dX_2}{d\varphi} \sin\varphi$$

$$Y_{17}(\varphi) = Y_1 \mu \cos\varphi - \frac{dY_1}{d\varphi} \sin\varphi \qquad (2.158)$$

$$Y_{18}(\varphi) = Y_2 \mu \cos\varphi - \frac{dY_2}{d\varphi} \sin\varphi.$$

Cu aceste notaţii, expresiile deplasărilor şi ale intensităţilor eforturilor devin :

$$\theta = \frac{1}{EhR}(C_1X_{15} + C_2X_{16} + C_3Y_{15} + C_4Y_{16}) + \theta^*$$

$$w = \frac{1}{Eh}(C_1X_{17} + C_2X_{18} + C_3Y_{17} + C_4Y_{18}) +$$

$$+ \frac{R\sin\varphi}{Eh}\left[p_n R - (1+\mu)\frac{F_1(\varphi)}{R\sin^2\varphi} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{R}\left(\mu V^* \operatorname{ctg}\varphi - \frac{dV^*}{d\varphi}\right) + Eh\alpha T\right] \qquad (2.159)$$

$$N_\varphi = \frac{F_1(\varphi)}{R\sin^2\varphi} - \frac{V^*}{R}\operatorname{ctg}\varphi - \frac{\operatorname{ctg}\varphi}{R}(C_1X_1 + C_2X_2 + C_3Y_1 + C_4Y_2)$$

$$N_\psi = p_n R - \frac{F_1(\varphi)}{R\sin^2\varphi} - \frac{1}{R}\frac{dV^*}{d\varphi} -$$

$$- \frac{1}{R}\left(C_1\frac{dX_1}{d\varphi} + C_2\frac{dX_2}{d\varphi} + C_3\frac{dY_1}{d\varphi} + C_4\frac{dY_2}{d\varphi}\right)$$

$$Q = \frac{1}{R}(C_1X_1 + C_2X_2 + C_3Y_1 + C_4Y_2) + \frac{V^*}{R}$$

Scanned with OKEN Scanner

$$S = \frac{1}{R\sin\varphi}\left[C_1X_1 + C_2X_2 + C_3Y_1 + C_4Y_2 + V^* - F_1(\varphi)\operatorname{cotg}\varphi\right]$$

$$M_\varphi = \frac{1}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{h}{R}\right)^2 (C_1X_{11} + C_2X_{12} - C_3X_{13} - C_4X_{14}) -$$

$$- \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)R}\left(\frac{\mathrm{d}\theta^*}{\mathrm{d}\varphi} + \mu\theta^*\operatorname{cotg}\varphi\right) + \frac{Eh^3}{12(1-\mu)R}\alpha\Delta T \qquad (2.159)$$

$$M_\psi = \frac{1}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{h}{R}\right)^2 (C_1Y_{11} + C_2Y_{12} - C_3Y_{13} - C_4Y_{14}) -$$

$$- \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)R}\left(\theta^*\operatorname{cotg}\varphi + \mu\frac{\mathrm{d}\theta^*}{\mathrm{d}\varphi}\right) + \frac{Eh^3}{12(1-\mu)R}\alpha\Delta T.$$

Determinarea soluţiilor particulare V^*, θ^* ale sistemului de ecuaţii (2.149) se face separat pentru solicitările termice şi pentru celelalte solicitări; apoi se însumează efectele.

2.6.2. *Soluţiile particulare V^*, θ^* pentru solicitarea cu presiune interioară, efort axial şi forţe de inerţie provenite din mişcarea de rotaţie*

Se consideră că învelişul sferic este solicitat cu o presiune interioară uniformă p, o forţă axială de întindere, a cărei rezultantă este P şi sarcinile masice provenite din mişcarea de rotaţie a învelişului faţă de axa sa, cu viteza unghiulară constantă ω.

Dacă se face o secţiune normală pe axa învelişului, ca în figura 2.16, ecuaţia de echilibru a forţelor pe direcţie axială se scrie sub forma

$$2\pi R\sin\varphi\,(N_\varphi\sin\varphi + Q\cos\varphi) = P + \pi R^2\sin^2\varphi\cdot p.$$

Rezultă

$$F_1(\varphi) = R\sin\varphi\,(N_\varphi\sin\varphi + Q\cos\varphi) = \frac{P}{2\pi} + \frac{pR^2}{2}\sin^2\varphi. \qquad (2.160')$$

Sarcina masică radială provenită din mişcarea de rotaţie este

$$f = \frac{\gamma}{g}h\omega^2 R\sin\varphi,$$

astfel încît, componentele sarcinii distribuite din înveliş sînt

— pe direcţia normalei la suprafaţa mediană

$$p_n = p + \frac{\gamma}{g} hR\omega^2 \sin^2 \varphi, \tag{2.161'}$$

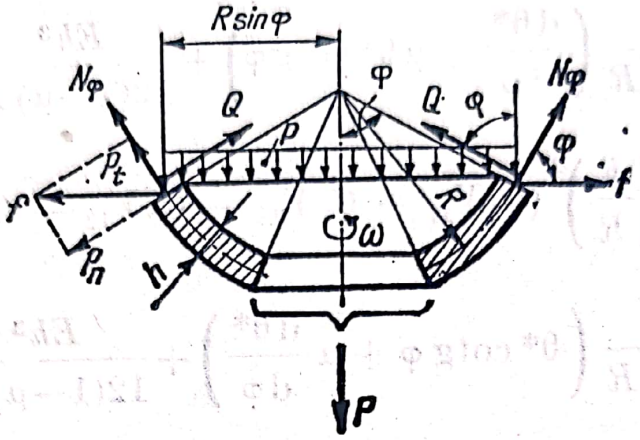


Fig. 2.16

— pe direcţia tangentei la meridian

$$p_t = \frac{\gamma}{g} hR\omega^2 \sin \varphi \cos \varphi. \tag{2.161''}$$

Din cea de a treia relaţie (2.150) rezultă

$$F_0(\varphi) = (3 + \mu) \frac{\gamma}{g} hR^3\omega^2 \sin \varphi \cos \varphi. \tag{2.162'}$$

Înlocuind această expresie în sistemul (2.149) şi observînd că cea de a doua funcţie a sarcinii $F_2(\varphi)$ este nulă, se pot determina soluţiile particulare V^* şi θ^*.

S-au căutat soluţii de forma

$$V^* = c_v \sin\varphi \cos\varphi$$

$$\theta^* = c_\theta \sin\varphi \cos\varphi$$

În urma înlocuirilor în (2.149) s-au găsit soluţiile particulare

$$V^* = -\frac{(5 + \mu)(3 + \mu)}{(25 - \mu^2) D + EhR^2} \frac{\gamma}{g} DhR^3 \omega^2 \sin \varphi \cos \varphi \tag{2.163}$$

$$\theta^* = -\frac{3 + \mu}{(25 - \mu^2) D + EhR^2} \frac{\gamma}{g} hR^4\omega^2 \sin \varphi \cos \varphi.$$

2.6.3. *Soluțiile particulare V^*, θ^* pentru solicitările termice*

Făcînd aceleaşi ipoteze şi notaţii ca pentru învelişul conic (pct. 2.5.3), rezultă

$$F_2(\varphi) = (1 + \mu)\, h^3 \alpha \frac{\mathrm{d}(\Delta T)}{\mathrm{d}\varphi} \qquad (2.160'')$$

$$F_0(\varphi) = EhR\alpha \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}\varphi} \qquad (2.162''')$$

expresii care se înlocuiesc în sistemul (2.149), pentru a putea determina soluţiile particulare V^* şi θ^*.

Forma soluţiilor particulare care se caută s-a considerat astfel :

$$V^* = k_1 \varphi^{k_2} (\cos\varphi)^{k_3} (\sin\varphi)^{k_4}$$

$$\theta^* = c_1 \varphi^{c_2} (\cos\varphi)^{c_3} (\sin\varphi)^{c_4}.$$

În urma înlocuirilor în (2.149) rezultă că trebuie ca : $c_2 = k_2 = 0$; $c_3 = k_3 = 1$ sau 0 ; $c_4 = k_4 = 1$ sau -1.

În final, rezultă că pentru funcţiile de temperatură

$$T(\varphi) = \bar{a}_0 + \frac{1}{2}\bar{a}_1 \sin^2\varphi + \bar{a}_2 \ln\sin\varphi - \bar{a}_3 \cos\varphi + \bar{a}_4 \ln \operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}$$

$$\Delta T(\varphi) = \bar{b}_0 + \frac{1}{2}\bar{b}_1 \sin^2\varphi + \bar{b}_2 \ln\sin\varphi - \bar{b}_3 \cos\varphi + \bar{b}_4 \ln \operatorname{tg}\frac{\varphi}{2} \qquad (2.164)$$

soluţiile particulare sînt

$$V^* = Eh^2\alpha\left[\frac{d_1}{2} e_{10} \sin 2\varphi + d_7 \frac{R}{h}\left(e_{11}\operatorname{cotg}\varphi + e_{12}\sin\varphi + \frac{e_{13}}{\sin\varphi}\right)\right] \qquad (2.165)$$

$$\theta^* = \alpha\left(\frac{e_{14}}{2}\sin 2\varphi + e_{15}\operatorname{cotg}\varphi + e_{16}\sin\varphi + \frac{e_{17}}{\sin\varphi}\right)$$

în care s-au notat

$$\bar{b}_0 = b_0 ; \quad \bar{b}_i = Rb_i \text{ pentru } i = 1, 2, 3, 4$$

$$d_0 = (25 - \mu^2)\left(\frac{h}{R}\right)^2 + 12\,(1 - \mu^2)$$

$$d_1 = \frac{1}{d_0}\,(5 + \mu)\,\frac{h}{R}$$

$$d_2 = \frac{1 + \mu}{5 + \mu}\,; \qquad d_3 = \frac{1 + \mu}{1 - \mu}$$

$$d_4 = \frac{1}{\frac{1}{12}\left(\frac{h}{R}\right)^2 + 1} \qquad d_5 = \frac{12}{d_0}\,(1 - \mu^2)\,(3 + \mu) \tag{2.166}$$

$$d_6 = \frac{12}{d_0}\,(1 - \mu^2) \qquad d_7 = \frac{1}{(1 + \mu)\left[1 + 12\left(\frac{R}{h}\right)^2\right]}$$

$$e_{10} = d_2\bar{b}_1 - \bar{a}_1, \qquad e_{12} = d_3(\bar{b}_3 - \bar{a}_3)$$

$$e_{11} = d_3\bar{b}_3 + \bar{a}_2, \qquad e_{13} = d_3\bar{b}_4 + \bar{a}_4$$

$$e_{14} = d_6(d_2\bar{b}_1 - \bar{a}_1) - d_2\bar{b}_1$$

$$e_{15} = d_3\bar{b}_2 - d_4(d_3\bar{b}_2 + \bar{a}_2)$$

$$e_{16} = d_4(\bar{b}_3 - \bar{a}_3) - \bar{b}_3$$

$$e_{17} = d_3\bar{b}_4 - d_4(d_3\bar{b}_4 + \bar{a}_4).$$

2.6.4. *Expresiile eforturilor și deplasărilor pentru cazul general de solicitare*

Pentru cazul general de solicitare considerat, se însumează relațiile (2.163) și (2.165), obținîndu-se forma completă a soluțiilor particulare ale sistemului de ecuații diferențiale (2.149),

$$V^*(\varphi) = Eh^2\left\{\frac{1}{2}\,d_1\left[\alpha e_{10} - (3 + \mu)\,\frac{\gamma R^2\omega^2}{gE}\right]\sin 2\varphi +\right.$$

$$+ d_7\alpha \frac{R}{h}\left(e_{11}\operatorname{cotg}\varphi + e_{12}\sin\varphi + \frac{e_{13}}{\sin\varphi}\right)\Bigg\}$$

$$\theta^*(\varphi) = \frac{1}{2}\left(\alpha e_{14} - d_5\frac{\gamma R^2\omega^2}{gE}\right)\sin 2\varphi + \tag{2.167}$$

$$+ \alpha\left(e_{15}\operatorname{cotg}\varphi + e_{16}\sin\varphi + \frac{e_{17}}{\sin\varphi}\right).$$

Prima şi a doua funcţie a sarcinii sînt respectiv (2.160′) şi (2.160″) iar funcţia F_0 se obţine însumînd expresiile (2.162′) şi (2.162″)

$$F_0(\varphi) = (3+\mu)\frac{\gamma}{g}hR^3\omega^2\sin\varphi\cos\varphi + EhR\alpha\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}\varphi}. \tag{2.168}$$

Pentru simplificarea scrierii expresiilor eforturilor şi deplasărilor, termenii care nu conţin constantele de integrare se calculează separat, aşa cum s-a procedat şi pentru învelişul conic, la punctul 2.5.3.

Se notează

$$M^*_\varphi(\varphi) = \frac{1}{12(1-\mu)}\frac{Eh^3}{R}\left[\alpha\Delta T(\varphi) - \frac{1}{1+\mu}\left(\frac{\mathrm{d}\theta^*}{\mathrm{d}\varphi} + \mu\theta^*\operatorname{cotg}\varphi\right)\right]$$

$$M^*_\psi(\varphi) = \frac{1}{12(1-\mu)}\frac{Eh^3}{R}\left[\alpha\Delta T(\varphi) - \frac{1}{1+\mu}\left(\theta^*\operatorname{cotg}\varphi + \mu\frac{\mathrm{d}\theta^*}{\mathrm{d}\varphi}\right)\right]$$

$$N^*_\varphi(\varphi) = \frac{F_1(\varphi)}{R\sin^2\varphi} - \frac{V^*}{R}\operatorname{cotg}\varphi \tag{2.169}$$

$$N^*_\psi(\varphi) = p_n R - \frac{F_1(\varphi)}{R\sin^2\varphi} - \frac{1}{R}\frac{\mathrm{d}V^*}{\mathrm{d}\varphi}$$

$$S^*(\varphi) = \frac{1}{R\sin\varphi}\left[V^* - F_1(\varphi)\operatorname{cotg}\varphi\right]$$

Scanned with OKEN Scanner

$$w^*(\varphi) = \frac{R\sin\varphi}{Eh}\left[p_n R - (1+\mu)\frac{F_1(\varphi)}{R\sin^2\varphi} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{R}\left(\mu V^* \operatorname{cotg}\varphi - \frac{dV^*}{d\varphi}\right) + Eh\alpha T\right]. \qquad (2.169)$$

În concluzie, toţi termenii care intervin în relaţiile (2.159) au fost precizaţi, astfel încît se pot exprima eforturile şi deplasările pe cele două contururi de capăt ale învelişului, în vederea scrierii condiţiilor de continuitate. După determinarea constantelor de integrare, cu expresiile intensităţilor eforturilor de întindere şi încovoiere se pot afla tensiunile în orice punct al învelişului.

Pentru învelişul sferic considerat se pot ivi trei cazuri distincte de scriere a condiţiilor de continuitate şi a condiţiilor la limită şi anume :

1°. *Înveliş cu ambele contururi de legătură.* Se înlocuiesc valorile variabilei φ corespunzătoare celor două margini ale învelişului ($\varphi = \varphi_1$ şi $\varphi = \varphi_2$) în expresiile w, θ, M_φ, S din grupul notat cu (2.159).

2°. *Înveliş cu primul contur* ($\varphi = \varphi_1$) *de legătură şi cel de al doilea contur* ($\varphi = \varphi_2$) *liber.* Dacă cea de a doua margine a învelişului este liberă, trebuie ca

$$M_\varphi(\varphi_2) = 0\,; \qquad S(\varphi_2) = 0.$$

Din a şaptea şi a şasea relaţie (2.159) rezultă

$$C_1X_{11}(\varphi_2) + C_2X_{12}(\varphi_2) - C_3X_{13}(\varphi_2) - C_4X_{14}(\varphi_2) =$$

$$= -12(1-\mu^2)\left(\frac{R}{h}\right)^2 M^*_\varphi(\varphi_2) \qquad (2.170)$$

$$C_1X_1(\varphi_2) + C_2X_2(\varphi_2) + C_3Y_1(\varphi_2) + C_4Y_2(\varphi_2) = -S^*(\varphi_2)\,R\sin\varphi_2$$

în care M^*_φ şi S^* sînt notaţiile (2.169).

Din sistemul de ecuaţii (2.170) se scot constantele de integrare C_3 şi C_4 funcţie de constantele C_1 şi C_2.

Se obţine

$$C_3 = -C_1z_{11}(\varphi_2) - C_2z_{12}(\varphi_2) - \frac{R}{h}z_{16}(\varphi_2)M^*_\varphi(\varphi_2) - Rz_{18}(\varphi_2)\,S^*(\varphi_2) \qquad (2.171)$$

$$C_4 = C_1z_{13}(\varphi_2) + C_2z_{14}(\varphi_2) + \frac{R}{h}z_{15}(\varphi_2)M^*_\varphi(\varphi_2) + Rz_{17}(\varphi_2)S^*(\varphi_2)$$

Scanned with OKEN Scanner

în care s-au notat

$$z_{10}(\varphi) = Y_1(\varphi)\, X_{14}(\varphi) - Y_2(\varphi)\, X_{13}(\varphi)$$

$$z_{11}(\varphi) = \frac{1}{z_{10}(\varphi)} [Y_2(\varphi) X_{11}(\varphi) + X_1(\varphi) X_{14}(\varphi)]$$

$$z_{12}(\varphi) = \frac{1}{z_{10}(\varphi)} [Y_2(\varphi) X_{12}(\varphi) + X_2(\varphi) X_{14}(\varphi)]$$

$$z_{13}(\varphi) = \frac{1}{z_{10}(\varphi)} [Y_1(\varphi) X_{11}(\varphi) + X_1(\varphi) X_{13}(\varphi)]$$

$$z_{14}(\varphi) = \frac{1}{z_{10}(\varphi)} [Y_1(\varphi) X_{12}(\varphi) + X_2(\varphi) X_{13}(\varphi)] \tag{2.172}$$

$$z_{15}(\varphi) = 12(1-\mu^2) \frac{R}{h} \frac{Y_1(\varphi)}{z_{10}(\varphi)}$$

$$z_{16}(\varphi) = 12(1-\mu^2) \frac{R}{h} \frac{Y_2(\varphi)}{z_{10}(\varphi)}$$

$$z_{17}(\varphi) = \frac{X_{13}(\varphi)}{z_{10}(\varphi)} \sin\varphi$$

$$z_{18}(\varphi) = \frac{X_{14}(\varphi)}{z_{10}(\varphi)} \sin\varphi$$

Făcînd în relaţiile corespunzătoare din grupul (2.159) $\varphi = \varphi_1$ şi înlocuind constantele C_3 şi C_4 cu formulele (2.171) se obţin expresiile deplasărilor şi eforturilor de legătură :

$$w(\varphi_1) = \frac{1}{Eh} \Big\{ C_1 [X_{17}(\varphi_1) - Y_{17}(\varphi_1)\, z_{11}(\varphi_2) + Y_{18}(\varphi_1)\, z_{13}(\varphi_2)] +$$

$$+ C_2 [X_{18}(\varphi_1) - Y_{17}(\varphi_1)\, z_{12}(\varphi_2) + Y_{18}(\varphi_1)\, z_{14}(\varphi_2)] +$$

$$+\frac{R}{h}M^*_\varphi(\varphi_2)[Y_{18}(\varphi_1)z_{15}(\varphi_2)-Y_{17}(\varphi_1)z_{16}(\varphi_2)]+$$

$$+RS^*(\varphi_2)[Y_{18}(\varphi_1)z_{17}(\varphi_2)-Y_{17}(\varphi_1)z_{18}(\varphi_2)]\Big\}+w^*(\varphi_1)$$

$$\theta(\varphi_1)=\frac{1}{Eh}\Big\{\frac{C_1}{R}[X_{15}(\varphi_1)-Y_{15}(\varphi_1)z_{11}(\varphi_2)+Y_{16}(\varphi_1)z_{13}(\varphi_2)]+$$

$$+\frac{C_2}{R}[X_{16}(\varphi_1)-Y_{15}(\varphi_1)z_{12}(\varphi_2)+Y_{16}(\varphi_1)z_{14}(\varphi_2)]+$$

$$+\frac{M^*(\varphi_2)}{h}[Y_{16}(\varphi_1)z_{15}(\varphi_2)-Y_{15}(\varphi_1)z_{16}(\varphi_2)]+$$

$$+S^*(\varphi_2)[Y_{16}(\varphi_1)z_{17}(\varphi_2)-Y_{15}(\varphi_1)z_{18}(\varphi_2)]\Big\}+\theta^*(\varphi_1)$$

$$M_\varphi(\varphi_1)=\frac{1}{12(1-\mu^2)}\frac{h}{R}\Big\{C_1\frac{h}{R}[X_{11}(\varphi_1)+X_{13}(\varphi_1)z_{11}(\varphi_2)- \tag{2.173}$$

$$-X_{14}(\varphi_1)z_{13}(\varphi_2)]+C_2\frac{h}{R}[X_{12}(\varphi_1)+X_{13}(\varphi_1)z_{12}(\varphi_2)-$$

$$-X_{14}(\varphi_1)z_{14}(\varphi_2)]+M^*_\varphi(\varphi_2)[X_{13}(\varphi_1)z_{16}(\varphi_2)-X_{14}(\varphi_1)z_{15}(\varphi_2)]+$$

$$+hS^*(\varphi_2)[X_{13}(\varphi_1)z_{18}(\varphi_2)-X_{14}(\varphi_1)z_{17}(\varphi_2)]\Big\}+M^*_\varphi(\varphi_1)$$

$$S(\varphi_1)=\frac{1}{\sin\varphi_1}\Big\{\frac{C_1}{R}[X_1(\varphi_1)-Y_1(\varphi_1)z_{11}(\varphi_2)+Y_2(\varphi_1)z_{13}(\varphi_2)]+$$

$$+\frac{C_2}{R}[X_2(\varphi_1)-Y_1(\varphi_1)z_{12}(\varphi_2)+Y_2(\varphi_1)z_{14}(\varphi_2)]+$$

$$+\frac{M^*_\varphi(\varphi_2)}{h}[Y_2(\varphi_1)z_{15}(\varphi_2)-Y_1(\varphi_1)z_{16}(\varphi_2)]+$$

$$+S^*(\varphi_2)[Y_2(\varphi_1)z_{17}(\varphi_2)-Y_1(\varphi_1)z_{18}(\varphi_2)]\Big\}+S^*(\varphi_1).$$

Scanned with OKEN Scanner

3°. *Înveliș cu primul contur* ($\varphi = \varphi_1$) *liber și cel de al doilea contur* ($\varphi = \varphi_2$) *de legătură.* Se procedează identic ca la punctul 2.6.4.2, în toate relațiile înlocuind φ_1 prin φ_2 și pe φ_2 prin φ_1.

2.7. Invelișul sferic cu o margine

Învelișul sferic considerat la paragraful 2.6 poate avea numai o margine, adică poate fi de forma unei calote sferice închisă la vîrf. Acesta este un caz particular al învelișului sferic cu două margini. În consecință relațiile de calcul și notațiile stabilite în paragraful precedent rămîn valabile, cu unele mici modificări, care se menționează mai jos.

a) Valoarea variabilei φ corespunzătoare marginii învelișului se notează φ_m.

b) Deoarece în vîrful învelișului ($\varphi = 0$) deplasările, eforturile și tensiunile au valori finite, trebuie ca

$$P = 0, \quad \bar{a}_2 = \bar{b}_2 = \bar{a}_4 = \bar{b}_4 = 0$$

$$C_2 = C_4 = 0 \tag{2.174}$$

în vecinătatea punctului $\varphi = 0$, funcțiile X_1 și Y_1 se determină cu relațiile [40]

$$X_1(\varphi) = \frac{\varphi}{8}\left[1 - \frac{1}{2}(m_2\varphi)^2\right]$$

$$Y_1(\varphi) = -\frac{m_2\varphi}{2}\left(1 + \frac{\varphi^2}{6}\right). \tag{2.175}$$

c) Expresiile deplasărilor și ale intensităților eforturilor pe conturul de legătură ($\varphi = \varphi_m$) sînt:

$$w(\varphi_m) = \frac{C_1}{Eh} X_{17}(\varphi_m) + \frac{C_2}{Eh} Y_{17}(\varphi_m) + w^*(\varphi_m)$$

$$\theta(\varphi_m) = \frac{C_1}{EhR} X_{15}(\varphi_m) + \frac{C_2}{EhR} Y_{15}(\varphi_m) + \theta^*(\varphi_m)$$

(2.176)

$$M_\varphi(\varphi_m) = \frac{1}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{h}{R}\right)^2 [C_1 X_{11}(\varphi_m) - C_2 X_{13}(\varphi_m)] + M_\varphi^*(\varphi_m)$$

$$S(\varphi_m) = \frac{1}{R \sin \varphi_m} [C_1 X_1(\varphi_m) + C_2 Y_1(\varphi_m)] + S^*(\varphi_m)$$

în care constanta C_2 corespunde constantei C_3 din relaţiile stabilite la § 2.6.

Capitolul III

Algoritmul de rezolvare a structurilor izotrope, axial simetrice

Rezolvarea unei structuri izotrope, axial simetrică, se face descompunînd-o în elemente geometrice simple, pentru care se cunosc relaţiile de calcul. Apoi se scriu condiţii de continuitate, pe contururile de îmbinare ale acestora, în vederea determinării constantelor de integrare care intervin în expresiile eforturilor şi deplasărilor fiecărui element. În acest scop, în capitolul precedent s-au stabilit relaţiile de calcul a şapte tipuri de elemente.

În cadrul capitolului de faţă, se prezintă algoritmul folosit pentru descrierea structurii, determinarea constantelor de integrare şi alcului tensiunilor [13], [19].

3.1. Transformarea relaţiilor de calcul

În vederea simplificării calculelor şi a obţinerii unor rezultate cu o cît mai mare generalitate, relaţiile stabilite în capitolul precedent se transformă pentru a introduce mărimi adimensionale. Aceste mărimi se referă la geometria elementelor, sarcini, constante de material, constante de integrare, eforturi, tensiuni. Variabilele adimensionale s-au introdus deja.

Scanned with OKEN Scanner

De asemenea, utilizarea variabilelor şi parametrilor adimensionali duce la creşterea preciziei calculelor numerice ca urmare a restrîngerii ordinului de mărime al valorilor care intră în calcule [30].

O mărime oarecare X va avea simbolul $\bar{X}$ cînd se face referire la mărimea similară adimensională.

Constantele de integrare adimensionale se definesc astfel:

— pentru învelişurile cilindrice

$$\bar{C}_i = \frac{C_i}{R}, \tag{3.1'}$$

— pentru învelişul conic

$$\bar{C}_i = C_i \frac{\cos \varphi}{EhR} \tag{3.1''}$$

în care

$$i = 1, 2, 3, 4.$$

Sarcinile adimensionale sînt

— presiunea uniformă

$$\bar{p} = \frac{pR}{2Eh}, \tag{3.2'}$$

— sarcina axială

$$\bar{P} = \frac{P}{2\pi REh}, \tag{3.2''}$$

— sarcina masică, provenită din mişcarea de rotaţie

$$\bar{\omega} = \frac{\gamma R^2 \omega^2}{gE}. \tag{3.2'''}$$

Intensităţile eforturilor adimensionale s-au definit sub forma:

— pentru eforturile de membrană

$$\bar{N} = \frac{N}{Eh}, \tag{3.3'}$$

— pentru eforturile de încovoiere

$$\bar{M} = \frac{M}{Eh^2}, \tag{3.3''}$$

în care N şi M, pot fi oricare din eforturi, adică radiale sau circumferenţiale.

Observație. În relațiile (3.2′), (3.2″), (3.3′), (3.3″) h devine H pentru plăcile plane.

Pentru învelișul conic și pentru învelișurile sferice s-au mai introdus următoarele mărimi adimensionale:

— intensitatea efortului radial

$$\bar{S} = \frac{S}{Eh}, \tag{3.3‴}$$

— funcția V și V^*

$$\bar{V} = \frac{V}{Eh^2}\ ;\ \bar{V}^* = \frac{V^*}{Eh^2}, \tag{3.4′}$$

— prima funcție a sarcinii

$$\bar{F}_1 = \frac{F_1}{EhR}. \tag{3.4″}$$

Coeficienții adimensionali $\bar{a}_i$ și $\bar{b}_i$ ai funcțiilor de temperatură au fost definiți în capitolul 2, prin relațiile (2.13‴), (2.28), (2.45), (2.57), (2.141), (2.166), iar abscisele adimensionale prin (2.4), (2.31), (2.60), (2.137).

De asemenea se definește deplasarea radială adimensională

$$\bar{w} = \frac{w}{R} \tag{3.5′}$$

și tensiunile adimensionale

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{E}. \tag{3.5″}$$

Din considerente care vor fi explicate pe larg în cele ce urmează, modulul de elasticitate E, raza R și grosimea h a fiecărui element al structurii se vor exprima ca rapoarte adimensionale față de mărimile corespunzătoare E^*, R^*, h^* ale unui element de bază, adică sub forma

$$\bar{E} = \frac{E}{E^*}\ ;\ \bar{R} = \frac{R}{R^*}\ ;\ \bar{h} = \frac{h}{h^*}. \tag{3.6}$$

În concluzie, parametrii care definesc fiecare element component al structurii pot fi dați ca mărimi exprimate într-un sistem coerent de unități de măsură, de exemplu sistemul metric, sau ca mărimi

adimensionale. Aceşti parametri se grupează în vederea introducerii mai comode în calculator, ca parametri de material, parametri geometrici şi parametrii încărcării.

În tabelul 3.1 se enumeră, pentru cele şapte tipuri de elemente studiate, parametrii dimensionali (notaţi în tabel „metric") şi cei adimensionali (notaţi în tabel „adim."). În prima coloană a tabelului s-au introdus în paranteze simbolurile elementelor, aşa cum vor fi ele folosite în cadrul limbajului de programare pe calculator. În cele ce urmează, pentru simplificarea scrierii se vor folosi cu precădere aceste denumiri prescurtate.

3.2. Scrierea condiţiilor de continuitate

Pentru fiecare din contururile de îmbinare ale structurii, se scriu un număr de condiţii de continuitate ale deplasărilor şi eforturilor elementelor care se asamblează pe conturul respectiv.

Dacă pe un contur oarecare se îmbină k_e elemente, pentru conturul respectiv se scriu următoarele condiţii de continuitate şi de echilibru :

a) Egalitatea deplasărilor radiale

$$w_1 = w_2 = \ldots = w_{k_e-1} = w_{k_e}. \tag{3.7}$$

Observaţie. Pentru plăcile plane deplasările radiale s-au notat ΔR, Δr.

b) Egalitatea rotirilor normalelor la suprafeţele mediane

$$\theta_1 = \theta_2 = \ldots = \theta_{k_e-1} = \theta_{k_e}. \tag{3.8}$$

c) Ecuaţia de echilibru a momentelor axiale

$$M_{x_1} + M_{x_2} + \ldots + M_{x_{k_e-1}} + M_{x_{k_e}} = 0. \tag{3.9}$$

Observaţie. De fapt momentele încovoietoare axiale s-au notat cu M_ρ, M_r şi M_R pentru plăcile plane, cu M_φ pentru învelişurile sferice şi cu M_x pentru celelalte.

d) Ecuaţia de echilibru a forţelor pe direcţie radială

$$Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_{k_e-1} + Q_{k_e} = 0. \tag{3.10}$$

Observaţie. 1°. Modul în care sînt scrise condiţiile (3.9) şi (3.10) implică ipoteza că eforturile de margine acţionează direct asupra

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.1

Parametrii elementelor structurilor

Tipul elementului	Tipul parametrului	Parametrii de material				Parametrii geometrici					Parametrii încărcării												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Înveliș cilindric scurt (CIS)	metric	μ	α	E	γ	R	h	L	—	—	p	P	ω	—	c_ω	c_x	a_0	a_1	a_2	a_3	ΔT	—	—
	adim.	μ	α	—	$\frac{E}{E^*}$	$\frac{R}{h}$	—	$\frac{R}{R^*}$	$\frac{h}{h^*}$	λ	$\bar{p}$	$\bar{P}$	$\bar{\omega}$	—	c_ω	c_x	$\bar{a}_0$	$\bar{a}_1$	$\bar{a}_2$	$\bar{a}_3$	ΔT	—	—
Înveliș cilindric lung (CIL)	metric	μ	α	E	γ	R	h	—	—	—	p	P	ω	c_p	c_ω	c_x	a_0	a_1	a_2	a_3	ΔT	—	—
	adim.	μ	α	—	$\frac{E}{E^*}$	$\frac{R}{h}$	—	$\frac{R}{R^*}$	$\frac{h}{h^*}$	—	$\bar{p}$	$\bar{P}$	$\bar{\omega}$	c_p	c_ω	c_x	$\bar{a}_0$	$\bar{a}_1$	$\bar{a}_2$	$\bar{a}_3$	ΔT	—	—
Placă plană inelară (PLI)	metric	μ	α	E	γ	R	H	r	—	—	p	P	ω	a_0	a_1	a_2	a_3	b_0	b_1	b_2	b_3	—	—
	adim.	μ	α	—	$\frac{E}{E^*}$	$\frac{R}{H}$	—	$\frac{R}{R^*}$	$\frac{H}{h^*}$	β	$\bar{p}$	$\bar{P}$	$\bar{\omega}$	$\bar{a}_0$	$\bar{a}_1$	$\bar{a}_2$	$\bar{a}_3$	$\bar{b}_0$	$\bar{b}_1$	$\bar{b}_2$	$\bar{b}_3$	—	—
Placă plană circulară (PLA)	metric	μ	α	E	γ	R	H	—	—	—	p	—	ω	a_0	a_1	a_2	a_3	b_0	b_1	b_2	b_3	—	—
	adim.	μ	α	—	$\frac{E}{E^*}$	$\frac{R}{H}$	—	$\frac{R}{R^*}$	$\frac{H}{h^*}$	—	$\bar{p}$	—	$\bar{\omega}$	$\bar{a}_0$	$\bar{a}_1$	$\bar{a}_2$	$\bar{a}_3$	$\bar{b}_0$	$\bar{b}_1$	$\bar{b}_2$	$\bar{b}_3$	—	—
Înveliș conic (CON)	metric	μ	α	E	γ	R	h	r	φ	—	p	P	ω	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	—	—	—	—
	adim.	μ	α	—	$\frac{E}{E^*}$	$\frac{R}{h}$	$\frac{R}{R^*}$	$\frac{h}{h^*}$	φ	β	$\bar{p}$	$\bar{P}$	$\bar{\omega}$	$\bar{a}_0$	$\bar{a}_1$	$\bar{a}_2$	$\bar{b}_0$	$\bar{b}_1$	$\bar{b}_2$	—	—	—	—
Înveliș sferic cu o margine (SFC)	metric	μ	α	E	γ	R	h	—	φ_m	—	p	—	ω	a_0	a_1	—	a_3	—	b_0	b_1	—	b_3	—
	adim.	μ	α	—	$\frac{E}{E^*}$	$\frac{R}{h}$	$\frac{R}{R^*}$	$\frac{h}{h^*}$	φ_m	—	$\bar{p}$	—	$\bar{\omega}$	$\bar{a}_0$	$\bar{a}_1$	—	$\bar{a}_3$	—	$\bar{b}_0$	$\bar{b}_1$	—	$\bar{b}_3$	—
Înveliș sferic cu două margini (SFE)	metric	μ	α	E	γ	R	h	—	φ_1	φ_2	p	P	ω	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
	adim.	μ	α	—	$\frac{E}{E^*}$	$\frac{R}{h}$	$\frac{R}{R^*}$	$\frac{h}{h^*}$	φ_1	φ_2	$\bar{p}$	$\bar{P}$	$\bar{\omega}$	$\bar{a}_0$	$\bar{a}_1$	$\bar{a}_2$	$\bar{a}_3$	$\bar{a}_4$	$\bar{b}_0$	$\bar{b}_1$	$\bar{b}_2$	$\bar{b}_3$	$\bar{b}_4$

Scanned with OKEN Scanner

suprafeţelor mediane ale elementelor respective. De asemenea s-a presupus că raza R a conturilor de îmbinare este aceeaşi cu razele suprafeţelor mediane ale marginilor elementelor.

2°. Toţi termenii ce intervin în (3.9), (3.10) ar fi trebuit înmulţiţi cu lungimea arcului elementar $Rd\varphi$ pe care acţionează intensităţile eforturilor M_x şi Q, pentru a obţine forţe şi momente concentrate, pentru care se scriu de fapt ecuaţiile de echilibru. Rezultă că în forma (3.9), (3.10), ecuaţiile de echilibru sînt deja simplificate cu factorul $Rd\varphi$.

Condiţia a, de egalitate a deplasărilor radiale înseamnă de fapt scrierea a $k_e - 1$ ecuaţii, tot atîtea fiind obţinute şi prin scrierea condiţiei b. Adăugînd la acestea cele două ecuaţii reprezentate de condiţiile c şi d, rezultă că pentru un contur pe care se îmbină k_e elemente, se obţin $2k_e$ ecuaţii.

Se stabileşte convenţia că din şirurile de egalităţi (3.7) şi (3.8) se formează ecuaţii prin considerarea succesivă a primului termen cu toţi ceilalţi, adică

$$w_1 - w_2 = 0,\ w_1 - w_3 = 0, \ldots, w_1 - w_{k_e} = 0,$$

şi (3.11)

$$\theta_1 - \theta_2 = 0,\ \theta_1 - \theta_3 = 0, \ldots, \theta_1 - \theta_{k_e} = 0.$$

Acceptînd această convenţie, rezultă că este obligatoriu ca succesiunea termenilor în condiţiile (3.7) şi în (3.8) să fie aceeaşi. De asemenea, trebuie ca termenii proveniţi de la primul element al şirurilor (3.7) şi (3.8) să fie multiplicaţi cu $+1$ iar ceilalţi cu -1. În acest scop, termenii respectivi se vor înmulţi cu un coeficient de rang δ, care va avea valoarea $\delta = 1$ dacă elementul este primul în şirurile (3.7) şi (3.8) şi $\delta = -1$ în caz contrar.

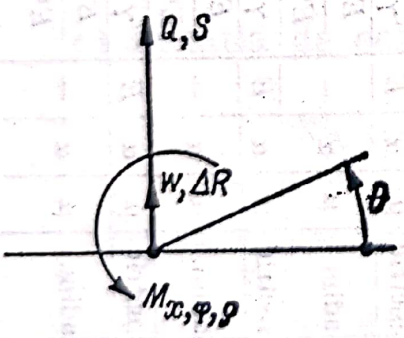


Fig. 3.1.

La scrierea condiţiilor a — d trebuie avute în vedere şi sensurile mărimilor respective, aşa cum rezultă ele din calcul pentru fiecare element, sau cum se modifică aceste sensuri pentru o anumită poziţie relativă a elementului faţă de conturul de îmbinare. În acest scop, s-a stabilit o convenţie de semne pentru sensurile pozitive ale celor patru mărimi care intervin în relaţiile (3.7)—(3.10), convenţie reprezentată în fig. 3.1.

Pentru considerarea efectului poziţiei relative a unui element faţă de conturul de îmbinare, se introduce un coeficient Ω de orientare a elementului. Se stabileşte că $\Omega = 1$, dacă poziţia elementului este „normală” şi $\Omega = -1$, dacă poziţia elementului este „inversă”.

Se poate stabili cu uşurinţă valoarea lui Ω, dacă se admite că structura este totdeauna raportată la o axă (axa structurii) orientată de la stînga la dreapta. Ataşînd fiecărui element un sens pozitiv în lungul axei proprii, se admite regula că elementul are

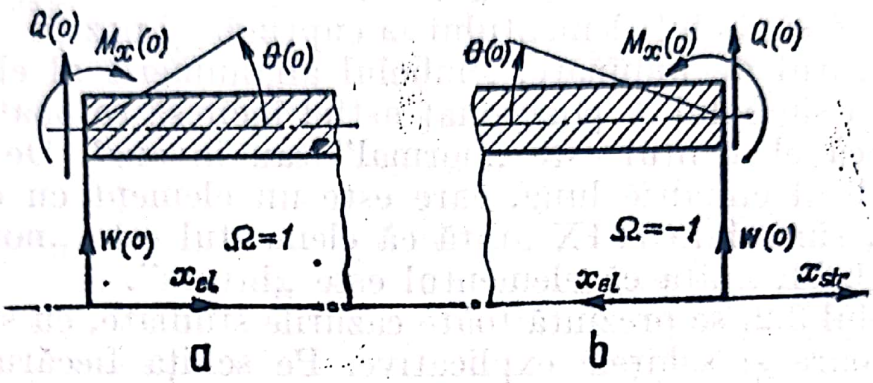


Fig. 3.2.

o orientare "normală" şi $\Omega = 1$, dacă sensul axei proprii coincide cu sensul axei structurii şi elementul are o orientare "inversă" şi $\Omega = -1$, în caz contrar.

În figura 3.2 se exemplifică regula de mai sus pentru un înveliş cilindric lung. Cînd învelişul este ca în figura 3.2, a poziţia sa este „normală" şi $\Omega = 1$, iar pentru situaţia reprezentată în figura 3.2, b poziţia este „inversă" şi $\Omega = -1$.

Din observarea figurii 3.2 se constată că poziţia elementului afectează numai sensul rotirii şi momentului încovoietor nu şi al deplasării radiale şi forţei tăietoare.

Pentru unele din elementele studiate în cadrul capitolului 2, s-au stabilit formulele de calcul pentru diverse situaţii ale marginilor elementelor (cînd elementul respectiv avea două margini). De exemplu, pentru învelişul cilindric scurt se pot întîlni următoarele cazuri:

— ambele margini de legătură;

— o margine de legătură şi cealaltă margine liberă;

— o margine de legătură şi cealaltă o secţiune în raport cu care învelişul este simetric.

Observaţie. Elemente cu ambele margini libere nu interesează, deoarece ele nu pot intra în componenţa unei structuri. Aceeaşi situaţie are loc cînd o margine este liberă iar cealaltă este secţiune în raport cu care elementul este simetric.

În vederea punerii în evidenţă a acestor situaţii, simbolul literar al fiecărui element (v. tabelul 3.1.) va fi completat de un simbol numeric care să indice tocmai „starea" marginilor elementului. Se

atribuie indicele 1 unei margini de legătură, indicele 0 unei margini libere şi indicele 2 unei secţiuni în raport cu care elementul este simetric. De exemplu, elementul CIS 11 este un înveliş cilindric scurt, cu ambele margini de legătură, pe cînd elementul CIS 01 este cu prima margine liberă şi cealaltă de legătură.

Pentru ca simbolul elementului să cuprindă şi poziţia sa relativă faţă de conturul de îmbinare, simbolul alfanumeric al elementului va conţine şi simbolul X poziţionat astfel încît să se poată pune în evidenţă dacă elementul este „normal" sau invers". De exemplu, pentru învelişul cilindric lung, care este un element cu o margine de legătură, simbolul CIL1X arată că elementul este „normal", iar simbolul CILX1, arată că elementul este „invers".

În tabelul 3.2. se prezintă toate cazurile studiate, cu simbolurile corespunzătoare şi schiţele explicative. Pe schiţa fiecărui element s-au reprezentat eforturile de legătură, rotirea şi deplasarea radială, numai pe marginile de legătură. Marginile fără săgeţile eforturilor şi deplasărilor, sînt margini libere iar marginile desenate cu linie punct sînt secţiuni în raport cu care elementele sînt simetrice.

Din analiza tabelului 3.2 rezultă că elementele CIS11, PLI11, CON11X, CONX11, SFE11X şi SFEX11 au cîte două margini de legătură. Deoarece condiţiile de continuitate sînt diferite pentru cele două margini, la aceste elemente s-au atribuit marginilor indicii de identificare I şi E. Marginii cu indicele I îi corespunde totdeauna valoarea minimă a variabilei, iar marginii cu indicele E valoarea maximă (v. tabelul 3.2).

Examinînd relaţiile de calcul stabilite pentru elementele structurilor în cadrul capitolului 2, se constată că elementelor cu două margini de legătură le corespund patru constante de integrare, iar celor cu o margine de legătură două constante. Aceasta înseamnă că numărul constantelor de integrare al unei structuri este egal cu dublul numărului marginilor de legătură ale elementelor care compun structura.

Observaţie. Pentru plăcile plane, constantele de integrare sînt considerate intensităţile eforturilor de contur $N_{r,R}$ şi $M_{r,R}$.

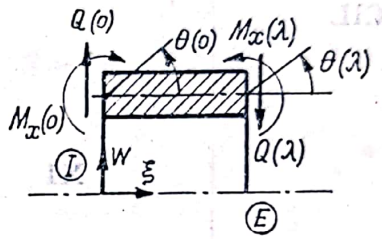
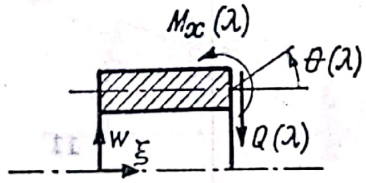
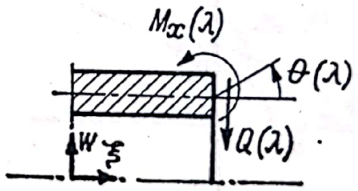
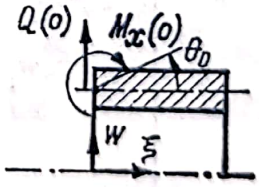
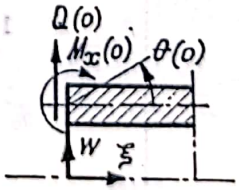
Ca urmare a scrierii condiţiilor de continuitate pentru toate contururile de îmbinare ale structurii, se obţine un sistem de ecuaţii algebrice liniare în care necunoscutele sînt *constantele de integrare adimensionale*. Se notează cu A_{ij} coeficienţii necunoscutelor şi cu B_i termenii liberi.

În tabelele 3.3. — 3.19 se dau expresiile finale ale coeficienţilor A_{ij} şi B_i pentru elementele studiate. La completarea acestor tabele s-au avut în vedere relaţiile stabilite în capitolul 2, cu însumarea efectelor acolo unde a fost cazul. De asemenea, s-au introdus mărimile

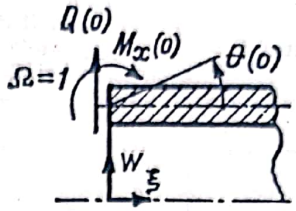
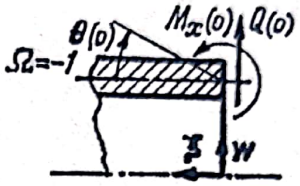
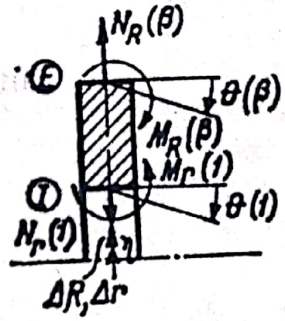
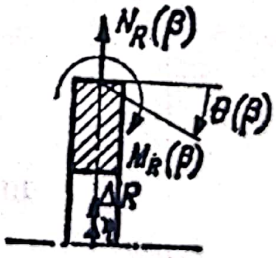
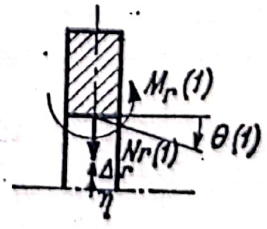
Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.2

Simbolurile elementelor structurilor

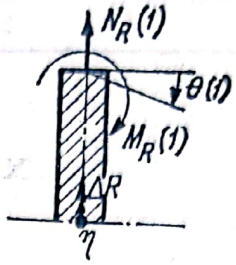
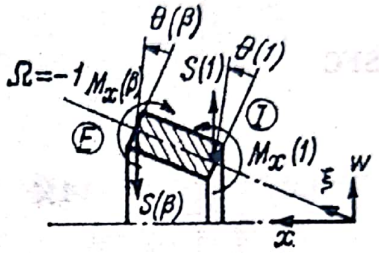
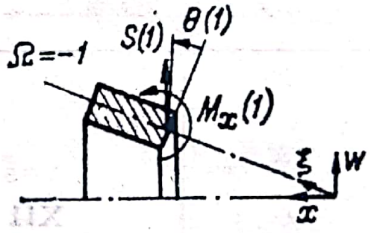
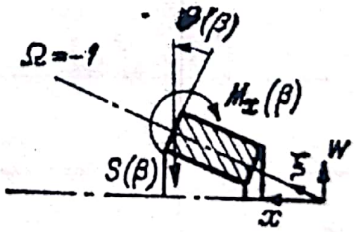
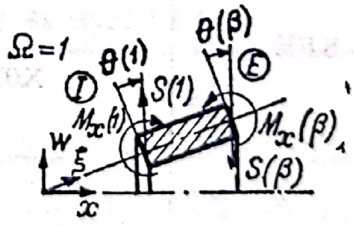
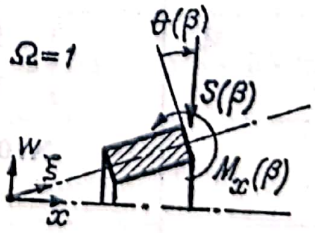
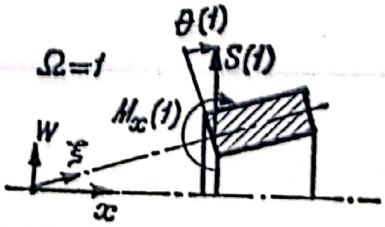
Simbolul elementului		Schița elementului
Tipul elementului	Indicii de „stare" ai marginilor	
1	2	3
	11	
CIS	01	
	21	
	10	
	12	

Tabelul 3.2 (continuare)

1	2	3
CIL	1X	
	X1	
PLI	11	
	01	
	10	

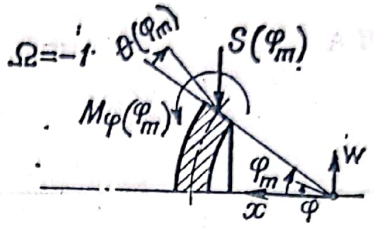
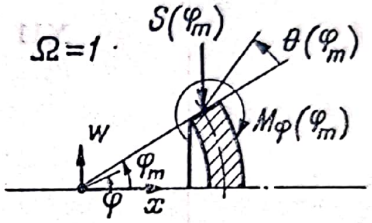
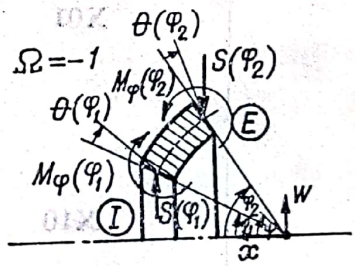
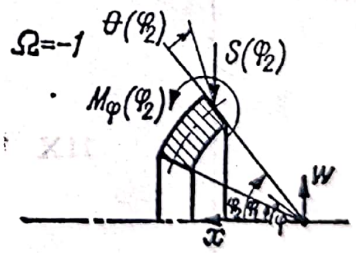
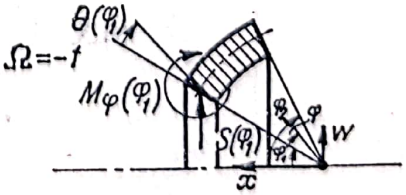
Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.2 (continuare)

1	2	3
PLA	—	
CON	X11	
	X01	
	X10	
	11X	
	01X	
	10X	

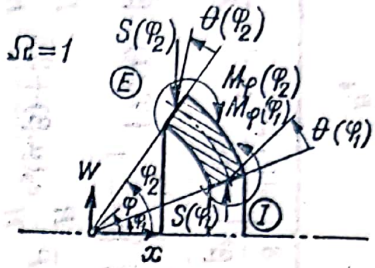
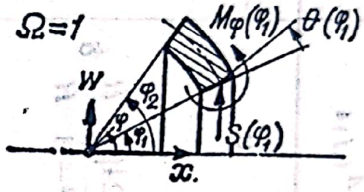
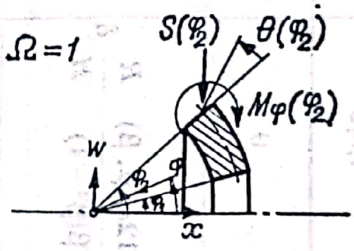
Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.2 (continuare)

1	2	3
SFC	X1	
	1X	
SFE	X11	
	X01	
	X10	

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.2 (continuare)

1	2	3
SFE	11X	
	01X	
	10X	

Tabelul 3.3

Coeficienţii A_{ij} şi R_i pentru elemente de tipul PLA

Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$	B_i
ΔR	$(1-\mu)\dfrac{R}{R^*}\delta$	0	$-\dfrac{R}{R^*}\delta\left[\dfrac{1-\mu}{4}\overline{\omega}+2\alpha T_0(1)\right]$
$\theta(1)$	0	$-12(1-\mu)\dfrac{R}{H}\delta$	$\dfrac{R}{H}\delta\left[3(1-\mu)\dfrac{R}{H}\overline{p}-2\alpha T_2(1)\right]$
$M_R(1)$	0	$-\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{H}{h^*}\right)^2$	0
$N_R(1)$	$\dfrac{E}{E^*}\dfrac{H}{h^*}$	0	0

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.4

Coeficienții A_{ij} și B_i pentru elemente de tipul PLI 11

	Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$	$A_{i,j+3}$	$A_{i,j+4}$	B_i
Marginea I ($\eta = 1$)	Δr	$-\frac{e_1(\mu,\beta)}{\beta(\beta^2-1)}\frac{R}{R^*}\delta$	$\frac{2\beta}{\beta^2-1}\cdot\frac{R}{R^*}\delta$	0	0	$-\frac{R}{R^*}\frac{\delta}{\beta^2}\left[\frac{e_2(\mu,\beta)}{4\beta}\overline{\omega}+\frac{2\beta}{\beta^2-1}\alpha T_1(\beta)\right]$
	$\theta(1)$	0	0	$\frac{12e_1(\mu,\beta)}{\beta(\beta^2-1)}\frac{R}{H}\delta$	$-\frac{24\beta}{\beta^2-1}\frac{R}{H}\delta$	$\frac{R}{H}\frac{\delta}{\beta}\left\{\frac{2\alpha}{\beta^2-1}[T_2(1)-\beta^2T_2(\beta)]+\right.$ $\left.+6\overline{P}\frac{R}{H}e_3(\mu,\beta)+3\overline{p}\frac{R}{H}e_4(\mu,\beta)\right\}$
	$M_r(1)$	0	0	$\frac{E}{E^*}\left(\frac{H}{h^*}\right)^2$	0	0
	$N_r(1)$	$-\frac{E}{E^*}\frac{H}{h^*}$	0	0	0	0
Marginea E ($\eta = \beta$)	ΔR	$-\frac{2}{\beta^2-1}\frac{R}{R^*}\delta$	$\frac{e_5(\mu,\beta)}{\beta^2-1}\frac{R}{R^*}\delta$	0	0	$-\frac{R}{R^*}\delta\left[\frac{\overline{\omega}}{4\beta^2}e_6(\mu,\beta)+\frac{2\alpha}{\beta^2-1}T_1(\beta)\right]$
	$\theta(\beta)$	0	0	$\frac{24}{\beta^2-1}\frac{R}{H}\delta$	$-\frac{12e_5(\mu,\beta)}{\beta^2-1}\frac{R}{H}\delta$	$\frac{R}{H}\delta\left\{\frac{2\alpha}{\beta^2-1}[T_2(1)-\beta^2T_2(\beta)]+\right.$ $\left.+3\frac{R}{H}[2\overline{P}e_7(\mu,\beta)+\overline{p}e_8(\mu,\beta)\right\}$
	$M_R(\beta)$	0	0	0	$-\frac{E}{E^*}\left(\frac{H}{h^*}\right)^2$	0
	$N_R(\beta)$	0	$\frac{E}{E^*}\frac{H}{h^*}$	0	0	0

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.5

Coeficienții A_{ij} și B_i pentru elemente de tipul PLI 01

Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$	B_i
ΔR	$\frac{e_5(\mu,\beta)}{\beta^2-1}\frac{R}{R^*}\delta$	0	$-\frac{R}{R^*}\delta\left[\frac{2\alpha}{\beta^2-1}T_1(\beta)+\frac{\overline{\omega}}{4\beta^2}e_6(\mu,\beta)\right]$
$\theta(\beta)$	0	$-\frac{12e_5(\mu,\beta)}{\beta^2-1}\frac{R}{H}\delta$	$\frac{R}{H}\delta\left\{\frac{2\alpha}{\beta^2-1}[T_2(1)-\beta^2T_2(\beta)]+3\frac{R}{H}[2\overline{Pe}_7(\mu,\beta)\overline{pe}_8(\mu,\beta)]\right\}$
$M_R(\beta)$	0	$-\frac{E}{E^*}\left(\frac{H}{h^*}\right)^2$	0
$N_R(\beta)$	$\frac{E}{E^*}\frac{H}{h^*}$	0	0

Tabelul 3.6

Coeficienții A_{ij} și B_i pentru elemente de tipul PLI 10

Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$	B_i
Δr	$-\frac{e_1(\mu,\beta)}{\beta(\beta^2-1)}\frac{R}{R^*}\delta$	0	$-\frac{R}{R^*}\frac{\delta}{\beta^2}\left[\frac{e_2(\mu,\beta)}{4\beta}\overline{\omega}+\frac{2\beta}{\beta^2-1}\alpha T_1(\beta)\right]$
$\theta(1)$	0	$\frac{12e_1(\mu,\beta)}{\beta(\beta^2-1)}\frac{R}{H}\delta$	$\frac{R}{H}\frac{\delta}{\beta}\left\{\frac{2\alpha}{\beta^2-1}[T_2(1)-\beta^2T_2(\beta)]+3\frac{R}{H}[2\overline{P}e_3(\mu,\beta)+\overline{p}e_4(\mu,\beta)]\right\}$
$M_r(1)$	0	$\frac{E}{E^*}\left(\frac{H}{h^*}\right)^2$	0
$N_r(1)$	$-\frac{E}{E^*}\cdot\frac{H}{h^*}$	0	0

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul

Coeficienţii $A_{i,j}$ şi B_i pentru

	Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$	$A_{i,j+3}$
Marginea I ($\xi = 0$)	$w(0)$	$\frac{R}{R^*}\delta$	0	0
	$\theta(0)$	0	$\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\frac{R}{h}}\delta$	0
	$M_x(0)$	0	0	$-\frac{1}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2$
	$Q(0)$	0	0	0
Marginea E ($\xi = \lambda$)	$w(\lambda)$	$V_1(\lambda)\frac{R}{R^*}\delta$	$V_2(\lambda)\frac{R}{R^*}\delta$	$V_3(\lambda)\frac{R}{R^*}\delta$
	$\theta(\lambda)$	$-4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\frac{R}{h}}V_4(\lambda)\delta$	$\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\frac{R}{h}}V_1(\lambda)\delta$	$\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\frac{R}{h}}V_2(\lambda)\delta$
	$M_x(\lambda)$	$-\frac{V_3(\lambda)}{\sqrt{3(1-\mu^2)}}\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2$	$-\frac{V_4(\lambda)}{\sqrt{3(1-\mu^2)}}\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2$	$\frac{V_1(\lambda)}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2$
	$Q(\lambda)$	$\frac{V_2(\lambda)}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{h}{R}}\frac{E}{E^*}\frac{h}{h^*}$	$\frac{V_3(\lambda)}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{h}{R}}\frac{E}{E^*}\frac{h}{h^*}$	$\frac{V_4(\lambda)}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{h}{R}}\frac{E}{E^*}\frac{h}{h^*}$

Tabelul

Coeficienţii A_{ij} şi B_i pentru

Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$
$w(\lambda)$	$V_1(\lambda)\frac{R}{R^*}\delta$	$V_2(\lambda)\frac{R}{R^*}\delta$
$\theta(\lambda)$	$-4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\frac{R}{h}}V_4(\lambda)\delta$	$\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\frac{R}{h}}V_1(\lambda)\delta$
$M_x(\lambda)$	$-\frac{V_3(\lambda)}{\sqrt{3(1-\mu^2)}}\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2$	$-\frac{V_4(\lambda)}{\sqrt{3(1-\mu^2)}}\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2$
$Q(\lambda)$	$\frac{V_2(\lambda)}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{h}{R}}\frac{E}{E^*}\frac{h}{h^*}$	$\frac{V_3(\lambda)}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{h}{R}}\frac{E}{E^*}\frac{h}{h^*}$

Scanned with OKEN Scanner

3.7

elemente de tipul CIS 11

$A_{i,\,i+4}$	B_i
0	$-\delta \dfrac{R}{R^*}\left[\bar{w}^*(0) + \sqrt{\dfrac{1+\mu}{3(1-\mu)}}\, U_1(\lambda)\,\alpha\Delta T\right]$
0	$-\delta\alpha\sqrt{\dfrac{R}{h}}\left[\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\, T_1(0) + \dfrac{1+\mu}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\, U_2(\lambda)\Delta T\right]$
0	$\dfrac{\alpha}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\, T_2(0)\, \dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2$
$\dfrac{1}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\dfrac{h}{R}\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}}$	$-\dfrac{\alpha}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\, T_3\sqrt{\dfrac{h}{R}\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}}$
$V_4(\lambda)\,\dfrac{R}{R^*}\,\delta$	$-\delta\,\dfrac{R}{R^*}\,[\bar{w}^*(\lambda) + \chi_2(\lambda,\lambda,\mu)\,\alpha\Delta T]$
$\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\dfrac{R}{h}}\, V_3(\lambda)\delta$	$-\delta\alpha\sqrt{\dfrac{R}{h}}\,[\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\, T_1(\lambda) + \chi_7(\lambda,\mu)\,\Delta T]$
$\dfrac{V_2(\lambda)}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\,\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2$	$-\dfrac{\alpha}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\, T_2(\lambda)\,\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2$
$\dfrac{-V_1(\lambda)}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\dfrac{h}{R}\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}}$	$\dfrac{\alpha}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\, T_3\sqrt{\dfrac{h}{R}\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}}$

3.8.

elemente de tipul CIS 01

B_i
$-\delta\,\dfrac{R}{R^*}\{\bar{w}^*(\lambda) + \alpha[\chi_2(\lambda,\lambda,\mu)\,\Delta T - T_2(0)\, V_3(\lambda) - T_3 V_4(\lambda)]\}$
$-\delta\alpha\sqrt{\dfrac{R}{h}}\left\{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,[T_1(\lambda) - T_2(0)V_2(\lambda) - T_3 V_3(\lambda)] + \chi_7(\lambda,\mu)\,\Delta T\right\}$
$\dfrac{\alpha}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\,\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2[T_2(0)V_1(\lambda) + T_3 V_2(\lambda) - T_2(\lambda)]$
$\dfrac{\alpha}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\dfrac{h}{R}\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}}\{4T_2(0)V_4(\lambda) + T_3[1 - V_1(\lambda)]\}$

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul

Coeficienţii A_{ij} şi B_i pentru

Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$
$w(\lambda)$	$V_1(\lambda)\,\dfrac{R}{R^*}\,\delta$	$V_3(\lambda)\,\dfrac{R}{R^*}\,\delta$
$\theta(\lambda)$	$-4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,\sqrt{\dfrac{R}{h}}\,V_4(\lambda)\delta$	$\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,\sqrt{\dfrac{R}{h}}\,V_2(\lambda)\delta$
$M_x(\lambda)$	$-\dfrac{V_3(\lambda)}{\sqrt{3(1-\mu^2)}}\,\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2$	$\dfrac{V_1(\lambda)}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\,\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2$
$Q(\lambda)$	$\dfrac{V_2(\lambda)}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\,\sqrt{\dfrac{h}{R}}\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}$	$\dfrac{V_4(\lambda)}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\,\sqrt{\dfrac{h}{R}}\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}$

Tabelul

Coeficienţii A_{ij} şi B_i pentru

Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$
$w(0)$	$\dfrac{R}{R^*}\,\delta$	0
$\theta(0)$	0	$\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,\sqrt{\dfrac{R}{h}}\,\delta$
$M_x(0)$	$-\dfrac{U_7(\lambda)}{\sqrt{3(1-\mu^2)}}\,\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2$	$-\dfrac{U_8(\lambda)}{\sqrt{3(1-\mu^2)}}\,\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2$
$Q(0)$	$\dfrac{U_9(\lambda)}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\,\sqrt{\dfrac{h}{R}}\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}$	$-\dfrac{U_7(\lambda)}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\,\sqrt{\dfrac{h}{R}}\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}$

Tabelul

Coeficienţii A_{ij} şi B_i pentru

Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$
$w(0)$	$\dfrac{R}{R^*}\,\delta$	0
$\theta(0)$	0	$\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,\sqrt{\dfrac{R}{h}}\,\delta$
$M_x(0)$	$\dfrac{U_1(2\lambda)}{\sqrt{3(1-\mu^2)}}\,\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2$	$\dfrac{U_{15}(\lambda)}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\,\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2$
$Q(0)$	$\dfrac{U_{16}(\lambda)}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\,\sqrt{\dfrac{h}{R}}\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}$	$\dfrac{U_1(2\lambda)}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\,\sqrt{\dfrac{h}{R}}\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}$

Scanned with OKEN Scanner

3.9

elemente de tipul CIS 21

B_i
$-\delta \frac{R}{R^*}\{\bar{w}^*(\lambda) + \alpha[\chi_8(\lambda, \lambda, \mu)\Delta T - T_1(0)V_2(\lambda) - T_3 V_4(\lambda)]\}$
$-\delta\alpha\sqrt{\frac{R}{h}}\{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,[T_1(\lambda) - T_1(0)V_1(\lambda) - T_3 V_3(\lambda)] + \chi_9(\lambda, \mu)\Delta T\}$
$\frac{\alpha}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2[T_3 V_2(\lambda) - 4T_1(0)V_4(\lambda) - T_2(\lambda)]$
$\frac{\alpha}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{h}{R}}\frac{E}{E^*}\frac{h}{h^*}\{4T_1(0)V_3(\lambda) + T_3[1 - V_1(\lambda)]\}$

3.10

elemente de tipul CIS 10

B_i
$-\delta \frac{R}{R^*}\left[\bar{w}^*(0) + \sqrt{\frac{1+\mu}{3(1-\mu)}}\,U_1(\lambda)\,\alpha\Delta T\right]$
$-\delta\alpha\sqrt{\frac{R}{h}}\left[\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,T_1(0) + \frac{1+\mu}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\,U_2(\lambda)\Delta T\right]$
$\frac{\alpha}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2[U_{12}(\lambda)\,T_3 - U_{11}(\lambda)\,T_2(\lambda) + T_2(0)]$
$\frac{\alpha}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{h}{R}}\frac{E}{E^*}\frac{h}{h^*}\{T_3[U_{11}(\lambda) - 1] + 4U_{13}(\lambda)T_2(\lambda)\}$

3.11

elemente de tipul CIS 12

B_i
$-\delta \frac{R}{R^*}\left[\bar{w}^*(0) + \sqrt{\frac{1+\mu}{3(1-\mu)}}\,U_3(\lambda)\,\alpha\Delta T\right]$
$-\delta\alpha\sqrt{\frac{R}{h}}\left[\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,T_1(0) + \frac{1+\mu}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\,U_4(\lambda)\,\Delta T\right]$
$-\frac{\alpha}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2[T_2(0) + U_{19}(\lambda)\,T_3 - U_{18}(\lambda)\,T_1(\lambda)]$
$-\frac{\alpha}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{h}{R}}\frac{E}{E^*}\frac{h}{h^*}\{4U_5(\lambda)T_1(\lambda) + T_3[1 - U_6(\lambda)]\}$

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul

Coeficienții A_{ij} și B_i pentru elemente de

	Expr.	$A_{i,i+1}$	$A_{i,i+2}$
Marginea I ($\xi = 1$)	$w(1)$	$-Y_6(1,\mu)\dfrac{R}{R^*}\delta$	$-Y_7(1,\mu)\dfrac{R}{R^*}\delta$
	$\theta(1)$	$2\sqrt{3(1-\mu^2)}\dfrac{Y_3(1)}{\cos\varphi}\dfrac{R}{h}\delta\Omega$	$2\sqrt{3(1-\mu^2)}\dfrac{Y_4(1)}{\cos\varphi}\dfrac{R}{h}\delta\Omega$
	$M_x(1)$	$\dfrac{-\beta Y_8(1,\mu)}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$	$\dfrac{-\beta Y_9(1,\mu)}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$
	$S(1)$	$\dfrac{\beta}{\cos\varphi}X_3(1)\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$	$\dfrac{\beta}{\cos\varphi}X_4(1)\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$
Marginea E ($\xi = \beta$)	$w(\beta)$	$-Y_6(\beta,\mu)\dfrac{R}{R^*}\delta$	$-Y_7(\beta,\mu)\dfrac{R}{R^*}\delta$
	$\theta(\beta)$	$2\sqrt{3(1-\mu^2)}\dfrac{Y_3(\beta)}{\cos\varphi}\dfrac{R}{h}\delta\Omega$	$2\sqrt{3(1-\mu^2)}\dfrac{Y_4(\beta)}{\cos\varphi}\dfrac{R}{h}\delta\Omega$
	$M_x(\beta)$	$\dfrac{Y_8(\beta,\mu)}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$	$\dfrac{Y_9(\beta,\mu)}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$
	$S(\beta)$	$-\dfrac{1}{\cos\varphi}X_3(\beta)\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$	$-\dfrac{1}{\cos\varphi}X_4(\beta)\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$

Scanned with OKEN Scanner

tipurile CON 11X ($\Omega=1$) şi CON X11 ($\Omega=-1$)

$A_{i,j+3}$	$A_{i,j+4}$	B_i
$-Y_8(1,\mu)\dfrac{R}{R^*}\delta$	$-Y_9(1,\mu)\dfrac{R}{R^*}\delta$	$-\bar{w}^*(1)\dfrac{R}{R^*}\delta$
$-2\sqrt{3(1-\mu^2)}\dfrac{X_3(1)}{\cos\varphi}\dfrac{R}{h}\delta\Omega$	$-2\sqrt{3(1-\mu^2)}\dfrac{X_4(1)}{\cos\varphi}\dfrac{R}{h}\delta\Omega$	$\theta^*(1)\,\delta\Omega$
$\dfrac{\beta Y_6(1,\mu)}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$	$\dfrac{\beta Y_7(1,\mu)}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$	$\bar{M}_x^*(1)\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$
$\dfrac{\beta}{\cos\varphi}Y_3(1)\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$	$\dfrac{\beta}{\cos\varphi}Y_4(1)\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$	$-\bar{S}^*_{(1)}\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$
$-Y_8(\beta,\mu)\dfrac{R}{R^*}\delta$	$-Y_9(\beta,\mu)\dfrac{R}{R^*}\delta$	$-\bar{w}^*(\beta)\dfrac{R}{R^*}\delta$
$-2\sqrt{3(1-\mu^2)}\dfrac{X_3(\beta)}{\cos\varphi}\dfrac{R}{h}\delta\Omega$	$-2\sqrt{3(1-\mu^2)}\dfrac{X_4(\beta)}{\cos\varphi}\dfrac{R}{h}\delta\Omega$	$\theta^*(\beta)\,\delta\Omega$
$-\dfrac{Y_6(\beta,\mu)}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$	$-\dfrac{Y_7(\beta,\mu)}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$	$-\bar{M}_x^*(\beta)\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$
$-\dfrac{1}{\cos\varphi}Y_3(\beta)\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$	$-\dfrac{1}{\cos\varphi}Y_4(\beta)\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$	$\bar{S}^*(\beta)\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul

Coeficienții A_{ij} și R_i pentru elemente de

Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$
$w(1)$	$\delta \frac{R}{R^*} [Y_9(1,\mu) z_3(\beta,\mu) - Y_6(1,\mu) - Y_8(1,\mu) z_1(\beta,\mu)]$	$\delta \frac{R}{R^*} [Y_9(1,\mu) z_4(\beta,\mu) - Y_7(1,\mu) - Y_8(1,\mu) z_2(\beta,\mu)]$
$\theta(1)$	$-2\sqrt{3(1-\mu^2)} \frac{\delta\Omega}{\cos\varphi} \frac{R}{h} [X_3(1) z_1(\beta,\mu) - X_4(1) z_3(\beta,\mu) - Y_3(1)]$	$-2\sqrt{3(1-\mu^2)} \frac{\delta\Omega}{\cos\varphi} \frac{R}{h} [X_3(1) z_2(\beta,\mu) - X_4(1) z_4(\beta,\mu) - Y_4(1)]$
$M_x(1)$	$\frac{-\beta\Omega}{\sqrt{12(1-\mu^2)}} \frac{E}{E^*} \left(\frac{h}{h^*}\right)^2 [Y_7(1,\mu) z_3(\beta,\mu) - Y_6(1,\mu) z_1(\beta,\mu) + Y_8(1,\mu)]$	$\frac{-\beta\Omega}{\sqrt{12(1-\mu^2)}} \frac{E}{E^*} \left(\frac{h}{h^*}\right)^2 [Y_7(1,\mu) z_4(\beta,\mu) - Y_6(1,\mu) z_2(\beta,\mu) + Y_9(1,\mu)]$
$S(1)$	$\frac{\beta}{\cos\varphi} \frac{E}{E^*} \frac{h}{h^*} [Y_3(1) z_1(\beta,\mu) - Y_4(1) z_3(\beta,\mu) + X_3(1)]$	$\frac{\beta}{\cos\varphi} \frac{E}{E^*} \frac{h}{h^*} [Y_3(1) z_2(\beta,\mu) - Y_4(1) z_4(\beta,\mu) + X_4(1)]$

Tabelul

Coeficienții A_{ij} și B_i pentru elemente de

Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$
$w(\beta)$	$\delta \frac{R}{R^*} [Y_9(\beta,\mu) z_3(1,\mu) - Y_6(\beta,\mu) - Y_8(\beta,\mu) z_1(1,\mu)]$	$\delta \frac{R}{R^*} [Y_9(\beta,\mu) z_4(1,\mu) - Y_7(\beta,\mu) - Y_8(\beta,\mu) z_2(1,\mu)]$
$\theta(\beta)$	$-2\sqrt{3(1-\mu^2)} \frac{\delta\Omega}{\cos\varphi} \frac{R}{h} [X_3(\beta) z_1(1,\mu) - Y_3(\beta) - X_4(\beta) z_3(1,\mu)]$	$-2\sqrt{3(1-\mu^2)} \frac{\delta\Omega}{\cos\varphi} \frac{R}{h} [X_3(\beta) z_2(1,\mu) - X_4(\beta) z_4(1,\mu) - Y_4(\beta)]$
$M_x(\beta)$	$\frac{\Omega}{\sqrt{12(1-\mu^2)}} \frac{E}{E^*} \left(\frac{h}{h^*}\right)^2 [Y_7(\beta,\mu) z_3(1,\mu) - Y_6(\beta,\mu) z_1(1,\mu) + Y_8(\beta,\mu)]$	$\frac{\Omega}{\sqrt{12(1-\mu^2)}} \frac{E}{E^*} \left(\frac{h}{h^*}\right)^2 [Y_7(\beta,\mu) z_4(1,\mu) - Y_6(\beta,\mu) z_2(1,\mu) + Y_9(\beta,\mu)]$
$S(\beta)$	$-\frac{1}{\cos\varphi} \frac{E}{E^*} \frac{h}{h^*} [Y_3(\beta) z_1(1,\mu) - Y_4(\beta) z_3(1,\mu) + X_3(\beta)]$	$-\frac{1}{\cos\varphi} \frac{E}{E^*} \frac{h}{h^*} [Y_3(\beta) z_2(1,\mu) - Y_4(\beta) z_4(1,\mu) + X_4(\beta)]$

Scanned with OKEN Scanner

3.13

tipurile CON 10X($\Omega = 1$) şi CON X01 ($\Omega = -1$)

B_i
$$-\delta\frac{R}{R^*}\{\overline{M}_x^*(\beta)[Y_9(1,\mu)z_5(\beta,\mu)-Y_8(1,\mu)z_6(\beta,\mu)]+$$ $$+\bar{S}^*(\beta)\cos\varphi[Y_9(1,\mu)z_7(\beta,\mu)-Y_8(1,\mu)z_8(\beta,\mu)]+\bar{w}^*(1)\}$$
$$\delta\Omega\left\{2\sqrt{3(1-\mu^2)}\,\frac{1}{\cos\varphi}\,\frac{R}{h}\,[\overline{M}^*(\beta)[X_3(1)z_6(\beta,\mu)-X_4(1)z_5(\beta,\mu)]+\right.$$ $$\left.+\bar{S}^*(\beta)\cos\varphi[X_3(1)z_8(\beta,\mu)-X_4(1)z_7(\beta,\mu)]]+\theta^*(1)\right\}$$
$$\Omega\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2\left\{\frac{\beta}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\,[\overline{M}_x^*(\beta)[Y_7(1,\mu)z_5(\beta,\mu)-Y_6(1,\mu)z_6(\beta,\mu)]+\right.$$ $$\left.+\bar{S}^*(\beta)\cos\varphi[Y_7(1,\mu)z_7(\beta,\mu)-Y_6(1,\mu)z_8(\beta,\mu)]]+\overline{M}_x^*(1)\right\}$$
$$-\frac{E}{E^*}\,\frac{h}{h^*}\left\{\frac{\beta}{\cos\varphi}\,[\overline{M}_x^*(\beta)[Y_3(1)z_6(\beta,\mu)-Y_4(1)z_5(\beta,\mu)]+\right.$$ $$\left.+\bar{S}^*(\beta)\cos\varphi[Y_3(1)z_8(\beta,\mu)-Y_4(1)z_7(\beta,\mu)]]+\bar{S}^*(1)\right\}$$

3.14

tipurile CON 01X ($\Omega = 1$) şi CON X10 ($\Omega = -1$)

B_i
$$-\delta\frac{R}{R^*}\left\{\frac{\overline{M}_x^*(1)}{\beta}\,[Y_9(\beta,\mu)z_5(1,\mu)-Y_7(\beta,\mu)z_6(1,\mu)]+\right.$$ $$\left.+\frac{1}{\beta}\,\bar{S}^*(1)\cos\varphi\,[Y_9(\beta,\mu)z_7(1,\mu)-Y_8(\beta,\mu)z_8(1,\mu)]+\bar{w}^*(\beta)\right\}$$
$$\delta\Omega\left\{2\sqrt{3(1-\mu^2)}\,\frac{1}{\beta\cos\varphi}\,\frac{R}{h}\,[\overline{M}_x^*(1)[X_3(\beta)z_6(1,\mu)-X_4(\beta)z_5(1,\mu)]+\right.$$ $$\left.+\bar{S}^*(1)\cos\varphi[X_3(\beta)z_8(1,\mu)-X_4(\beta)z_7(1,\mu)]]+\theta^*(\beta)\right\}$$
$$-\Omega\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2\left\{\frac{1}{\beta\sqrt{12(1-\mu^2)}}\,[\overline{M}_x^*(1)[Y_7(\beta,\mu)z_5(1,\mu)-Y_6(\beta,\mu)z_6(1,\mu)]+\right.$$ $$\left.+\bar{S}^*(1)\cos\varphi[Y_7(\beta,\mu)z_7(1,\mu)-Y_6(\beta,\mu)z_8(1,\mu)]]+\overline{M}_x^*(\beta)\right\}$$
$$\frac{E}{E^*}\,\frac{h}{h^*}\left\{\frac{1}{\beta}\left[\frac{\overline{M}_x^*(1)}{\cos\varphi}\,[Y_3(\beta)z_6(1,\mu)-Y_4(\beta)z_5(1,\mu)]+\right.\right.$$ $$\left.\left.+\bar{S}^*(1)[Y_3(\beta)z_4(1,\mu)-Y_4(\beta)z_7(1,\mu)]\right]+\bar{S}^*(\beta)\right\}$$

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul

Coeficienții A_{ij} și B_i pentru elemente de

	Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$
Marginea I ($\varphi = \varphi_1$)	$w(\varphi_1)$	$X_{17}(\varphi_1)\,\frac{R}{R^*}\,\delta$	$X_{18}(\varphi_1)\,\frac{R}{R^*}\,\delta$
	$\theta(\varphi_1)$	$X_{15}(\varphi_1)\,\delta\Omega$	$X_{16}(\varphi_1)\,\delta\Omega$
	$M_\varphi(\varphi_1)$	$\frac{X_{11}(\varphi_1)}{12(1-\mu^2)}\,\frac{h}{R}\,\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2\Omega$	$\frac{X_{12}(\varphi_1)}{12(1-\mu^2)}\,\frac{h}{R}\,\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2\Omega$
	$S(\varphi_1)$	$\frac{X_1(\varphi_1)}{\sin\varphi_1}\,\frac{E}{E^*}\,\frac{h}{h^*}$	$\frac{X_2(\varphi_1)}{\sin\varphi_1}\,\frac{E}{E^*}\,\frac{h}{h^*}$
Marginea E ($\varphi = \varphi_2$)	$w(\varphi_2)$	$X_{17}(\varphi_2)\,\frac{R}{R^*}\,\delta$	$X_{18}(\varphi_2)\,\frac{R}{R^*}\,\delta$
	$\theta(\varphi_2)$	$X_{15}(\varphi_2)\,\delta\Omega$	$X_{16}(\varphi_2)\,\delta\Omega$
	$M_\varphi(\varphi_2)$	$-\frac{X_{11}(\varphi_2)}{12(1-\mu^2)}\,\frac{h}{R}\,\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2\Omega$	$-\frac{X_{12}(\varphi_2)}{12(1-\mu^2)}\,\frac{h}{R}\,\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2\Omega$
	$S(\varphi_2)$	$-\frac{X_1(\varphi_2)}{\sin\varphi_2}\,\frac{E}{E^*}\,\frac{h}{h^*}$	$-\frac{X_2(\varphi_2)}{\sin\varphi_2}\,\frac{E}{E^*}\,\frac{h}{h^*}$

Tabelul

Coeficienții A_{ij} și B_i pentru elemente de

Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$
$w(\varphi_1)$	$\delta\frac{R}{R^*}\,[X_{17}(\varphi_1) - Y_{17}(\varphi_1)z_{11}(\varphi_2) + Y_{18}(\varphi_1)z_{13}(\varphi_2)]$	$\delta\frac{R}{R^*}\,[X_{18}(\varphi_1) - Y_{17}(\varphi_1)z_{12}(\varphi_2) + Y_{18}(\varphi_1)z_{14}(\varphi_2)]$
$\theta(\varphi_1)$	$\delta\Omega\,[X_{15}(\varphi_1) - Y_{15}(\varphi_1)z_{11}(\varphi_2) + Y_{16}(\varphi_1)z_{13}(\varphi_2)]$	$\delta\Omega[X_{16}(\varphi_1) - Y_{15}(\varphi_1)z_{12}(\varphi_2) + Y_{16}(\varphi_1)z_{14}(\varphi_2)]$
$M_\varphi(\varphi_1)$	$\frac{\Omega}{12(1-\mu^2)}\,\frac{h}{R}\,\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2[X_{11}(\varphi_1) + X_{13}(\varphi_1)z_{11}(\varphi_2) - X_{14}(\varphi_1)z_{13}(\varphi_2)]$	$\frac{\Omega}{12(1-\mu^2)}\,\frac{h}{R}\,\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2[X_{12}(\varphi_1) + X_{13}(\varphi_1)z_{12}(\varphi_2) - X_{14}(\varphi_1)z_{14}(\varphi_2)]$
$S(\varphi_1)$	$\frac{1}{\sin\varphi_1}\,\frac{E}{E^*}\,\frac{h}{h^*}\,[X_1(\varphi_1) - Y_1(\varphi_1)z_{11}(\varphi_2) + Y_2(\varphi_1)z_{13}(\varphi_2)]$	$\frac{1}{\sin\varphi_1}\,\frac{E}{E^*}\,\frac{h}{h^*}\,[X_2(\varphi_1) - Y_1(\varphi_1)z_{12}(\varphi_2) + Y_2(\varphi_1)z_{14}(\varphi_2)]$

Scanned with OKEN Scanner

3.15

tipurile SFE 11X ($\Omega = 1$) şi SFE X11 ($\Omega = -1$)

$A_{i,j+3}$	$A_{i,j+4}$	B_i
$Y_{17}(\varphi_1)\dfrac{R}{R^*}\delta$	$Y_{18}(\varphi_1)\dfrac{R}{R^*}\delta$	$-\bar{w}^*(\varphi_1)\dfrac{R}{R^*}\delta$
$Y_{15}(\varphi_1)\delta\Omega$	$Y_{16}(\varphi_1)\delta\Omega$	$-\theta^*(\varphi_1)\delta\Omega$
$-\dfrac{X_{13}(\varphi_1)}{12(1-\mu^2)}\dfrac{h}{R}\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$	$-\dfrac{X_{14}(\varphi_1)}{12(1-\mu^2)}\dfrac{h}{R}\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$	$-\bar{M}^*_\varphi(\varphi_1)\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2$
$\dfrac{Y_1(\varphi_1)}{\sin\varphi_1}\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$	$\dfrac{Y_2(\varphi_1)}{\sin\varphi_1}\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$	$-\bar{S}^*(\varphi_1)\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$
$Y_{17}(\varphi_2)\dfrac{R}{R^*}\delta$	$Y_{18}(\varphi_2)\dfrac{R}{R^*}\delta$	$-\bar{w}^*(\varphi_2)\dfrac{R}{R^*}\delta$
$Y_{15}(\varphi_2)\delta\Omega$	$Y_{16}(\varphi_2)\delta\Omega$	$-\theta^*(\varphi_2)\delta\Omega$
$\dfrac{X_{13}(\varphi_2)}{12(1-\mu^2)}\dfrac{h}{R}\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$	$\dfrac{X_{14}(\varphi_2)}{12(1-\mu^2)}\dfrac{h}{R}\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$	$\bar{M}^*_\varphi(\varphi_2)\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$
$-\dfrac{Y_1(\varphi_2)}{\sin\varphi_2}\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$	$-\dfrac{Y_2(\varphi_2)}{\sin\varphi_2}\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$	$\bar{S}^*(\varphi_2)\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}$

3.16

tipurile SFE 01X ($\Omega = 1$) şi SFE X10 ($\Omega = -1$)

B_i
$-\delta\dfrac{R}{R^*}\{\bar{M}^*_\varphi(\varphi_2)[Y_{18}(\varphi_1)z_{15}(\varphi_2)-Y_{17}(\varphi_1)z_{16}(\varphi_2)]+$ $+\bar{S}^*(\varphi_2)[Y_{18}(\varphi_1)z_{17}(\varphi_2)-Y_{17}(\varphi_1)z_{18}(\varphi_2)]+\bar{w}^*(\varphi_1)\}$
$-\delta\Omega\{\bar{M}^*_\varphi(\varphi_2)[Y_{16}(\varphi_1)z_{15}(\varphi_2)-Y_{15}(\varphi_1)z_{16}(\varphi_2)]+$ $+\bar{S}^*(\varphi_2)[Y_{16}(\varphi_1)z_{17}(\varphi_2)-Y_{15}(\varphi_1)z_{18}(\varphi_2)]+\theta^*(\varphi_1)\}$
$-\Omega\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\left\{\dfrac{1}{12(1-\mu^2)}\dfrac{h}{R}[\bar{M}^*_\varphi(\varphi_2)[X_{13}(\varphi_1)z_{16}(\varphi_2)-X_{14}(\varphi_1)z_{15}(\varphi_2)]+\right.$ $\left.+\bar{S}^*(\varphi_2)[X_{13}(\varphi_1)z_{18}(\varphi_2)-X_{14}(\varphi_1)z_{17}(\varphi_2)]]+\bar{M}^*_\varphi(\varphi_1)\right\}$
$-\dfrac{E}{E^*}\dfrac{h}{h^*}\left\{\dfrac{1}{\sin\varphi_1}[\bar{M}^*_\varphi(\varphi_2)[Y_2(\varphi_1)z_{15}(\varphi_2)-Y_1(\varphi_1)z_{16}(\varphi_2)]+\right.$ $\left.+\bar{S}^*(\varphi_2)[Y_2(\varphi_1)z_{17}(\varphi_2)-Y_1(\varphi_1)z_{18}(\varphi_2)]]+\bar{S}^*(\varphi_1)\right.$

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.17

Coeficienții A_{ij} și B_i pentru elemente de tipurile SFE 10X ($\Omega = 1$) și SFE XO1 ($\Omega = -1$)

Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$	B_i
$w(\varphi_2)$	$\delta \frac{R}{R^*}[X_{17}(\varphi_2) - Y_{17}(\varphi_2)z_{11}(\varphi_1) + Y_{18}(\varphi_2)z_{13}(\varphi_1)]$	$\delta \frac{R}{R^*}[X_{18}(\varphi_2) - Y_{17}(\varphi_2)z_{12}(\varphi_1) + Y_{18}(\varphi_2)z_{14}(\varphi_1)]$	$-\delta \frac{R}{R^*}\{\overline{M}^*_\varphi(\varphi_1)[Y_{18}(\varphi_2)z_{15}(\varphi_1) - Y_{17}(\varphi_2)z_{16}(\varphi_1)] + \overline{S}^*(\varphi_1)[Y_{18}(\varphi_2)z_{17}(\varphi_1) - Y_{17}(\varphi_2)z_{18}(\varphi_1)] + \overline{w}^*(\varphi_2)\}$
$\theta(\varphi_2)$	$\delta\Omega[X_{15}(\varphi_2) - Y_{15}(\varphi_2)z_{11}(\varphi_1) + Y_{16}(\varphi_2)z_{13}(\varphi_1)]$	$\delta\Omega[X_{16}(\varphi_2) - Y_{15}(\varphi_2)z_{12}(\varphi_1) + Y_{16}(\varphi_2)z_{14}(\varphi_1)]$	$-\delta\Omega\{\overline{M}^*_\varphi(\varphi_1)[Y_{16}(\varphi_2)z_{15}(\varphi_1) - Y_{15}(\varphi_2)z_{16}(\varphi_1)] + \overline{S}^*(\varphi_1)[Y_{16}(\varphi_2)z_{17}(\varphi_1) - Y_{15}(\varphi_2)z_{18}(\varphi_1)] + \theta^*(\varphi_2)\}$
$M_\varphi(\varphi_2)$	$-\frac{\Omega}{12(1-\mu^2)}\frac{h}{R}\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2 \times [X_{11}(\varphi_2) + X_{13}(\varphi_2)z_{11}(\varphi_1) - X_{14}(\varphi_2)z_{13}(\varphi_1)]$	$-\frac{\Omega}{12(1-\mu^2)}\frac{h}{R}\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2 \times [X_{12}(\varphi_2) + X_{13}(\varphi_2)z_{12}(\varphi_1) - X_{14}(\varphi_2)z_{14}(\varphi_2)]$	$\Omega\frac{E}{E^*}\left(\frac{h}{h^*}\right)^2\left\{\frac{1}{12(1-\mu^2)}\frac{h}{R} \times [\overline{M}^*_\varphi(\varphi_1)[X_{13}(\varphi_2)z_{16}(\varphi_1) - X_{14}(\varphi_2)z_{15}(\varphi_1)] + \overline{S}^*(\varphi_1)[X_{13}(\varphi_2)z_{18}(\varphi_1) - X_{14}(\varphi_2)z_{17}(\varphi_1)]] + \overline{M}^*_\varphi(\varphi_2)\right\}$
$S(\varphi_2)$	$-\frac{1}{\sin\varphi_2}\frac{E}{E^*}\frac{h}{h^*}[X_1(\varphi_2) - Y_1(\varphi_2)z_{11}(\varphi_1) + Y_2(\varphi_2)z_{13}(\varphi_1)]$	$-\frac{1}{\sin\varphi_2}\frac{E}{E^*}\frac{h}{h^*}[X_2(\varphi_2) - Y_1(\varphi_2)z_{12}(\varphi_1) + Y_2(\varphi_2)z_{14}(\varphi_1)]$	$\frac{E}{E^*}\frac{h}{h^*}\left\{\frac{1}{\sin\varphi_2}[\overline{M}^*_\varphi(\varphi_1)[Y_2(\varphi_2)z_{15}(\varphi_1) - Y_1(\varphi_2)z_{16}(\varphi_1)] + \overline{S}^*(\varphi_1)[Y_2(\varphi_2)z_{17}(\varphi_1) - Y_1(\varphi_2)z_{18}(\varphi_1)]] + \overline{S}^*(\varphi_2)\right\}$

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.18

Coeficienții A_{ij} și B_i pentru elemente de tipurile CIL 1X ($\Omega = 1$) și CIL X1 ($\Omega = -1$)

Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$	B_i
$w(0)$	$\dfrac{R}{R^*}\,\delta$	0	$-\delta\,\dfrac{R}{R^*}\left[\overline{w}^*(0) + \dfrac{1}{2}\sqrt{\dfrac{1+\mu}{3(1-\mu)}}\,\alpha\Delta T\right]$
$\theta(0)$	$\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,\sqrt{\dfrac{R}{h}}\,\delta\Omega$	$-\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,\sqrt{\dfrac{R}{h}}\,\delta\Omega$	$\delta\Omega\alpha\sqrt{\dfrac{R}{h}}\left[\dfrac{1+\mu}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\,\Delta T - \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,T_1(0)\right]$
$M_x(0)$	$\dfrac{\Omega}{2\sqrt{3(1-\mu^2)}}\,\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2$	0	$\Omega\,\dfrac{\alpha T_2(0)}{4\sqrt{3(1-\mu^2)}}\,\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2$
$Q(0)$	$\dfrac{1}{2\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\dfrac{h}{R}}\cdot\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}$	$\dfrac{1}{2\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\dfrac{h}{R}}\cdot\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}$	$-\dfrac{\alpha T_3}{4\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}\sqrt{\dfrac{h}{R}}\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}$

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.19

Coeficienţii A_{ij} şi B_i pentru elemente de tipurile SFC 1X ($\Omega=1$) şi SFC X1 ($\Omega=-1$)

Expr.	$A_{i,j+1}$	$A_{i,j+2}$	B_i
$w(\varphi_m)$	$X_{17}(\varphi_m)\,\dfrac{R}{R^*}\,\delta$	$Y_{17}(\varphi_m)\,\dfrac{R}{R^*}\,\delta$	$-\bar{w}^*(\varphi_m)\,\dfrac{R}{R^*}\,\delta$
$\theta(\varphi_m)$	$X_{15}(\varphi_m)\,\Omega\delta$	$Y_{15}(\varphi_m)\,\Omega\delta$	$-\,\theta^*(\varphi_m)\,\Omega\delta$
$M_\varphi(\varphi_m)$	$-\dfrac{X_{11}(\varphi_m)}{12(1-\mu^2)}\,\dfrac{h}{R}\,\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$	$\dfrac{X_{13}(\varphi_m)}{12(1-\mu^2)}\,\dfrac{h}{R}\,\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$	$\bar{M}^*_\varphi(\varphi_m)\,\dfrac{E}{E^*}\left(\dfrac{h}{h^*}\right)^2\Omega$
$S(\varphi_m)$	$-\dfrac{X_1(\varphi_m)}{\sin\varphi_m}\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}$	$-\dfrac{Y_1(\varphi_m)}{\sin\varphi_m}\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}$	$\bar{S}^*(\varphi_m)\,\dfrac{E}{E^*}\,\dfrac{h}{h^*}$

adimensionale definite în paragraful 3.1 şi coeficienţii δ şi Ω. Semnele termenilor s-au stabilit pe baza convenţiei din figura 3.1 a sensurilor pozitive ale eforturilor şi deplasărilor de legătură.

În prima coloană a tabelelor 3.3.—3.19 sînt menţionate tipurile expresiilor din care au fost obţinuţi coeficienţii din linia respectivă. Astfel $w(0)$ arată că termenii liniei provin din expresia deplasării radiale pe conturul de abscisă zero, iar θ, M_x, Q înseamnă aceleaşi menţiuni, privind respectiv rotirea, momentul încovoietor axial şi forţa tăietoare.

La scrierea condiţiilor de continuitate toţi termenii au fost aduşi la forme adimensionale, astfel încît, în ecuaţiile deplasărilor, momentelor încovoietoare şi forţelor radiale au fost scoşi în factor R, respectiv Eh^2, Eh. Deoarece aceste mărimi, în cazul general, sînt diferite de la un element la altul, factorii R, Eh^2 şi Eh nu se simplifică. De aceea s-a considerat că toate ecuaţiile se împart cu factori corespunzători în vederea obţinerii rapoartelor adimensionale R/R^*, E/E^* şi h/h^*, în care mărimile R^*, E^*, h^* sînt cele corespunzătoare unui element al structurii, convenabil ales, luat ca element de bază.

3.3. Calculul tensiunilor

După ce s-au calculat coeficienţii A_{ij} şi B_i ai sistemului de ecuaţii al structurii, se determină constantele de integrare, folosind una din metodele cunoscute pentru rezolvarea sistemelor de ecuaţii algebrice liniare.

Scanned with OKEN Scanner

Se menționează că valorile constantelor de integrare conțin informațiile asupra formei și comportării de ansamblu a structurii. Tensiunile se pot calcula pentru fiecare element separat, introducînd în expresiile respective valorile corespunzătoare ale constantelor de integrare.

Structura fiind izotropă și axial simetrică direcțiile principale ale stării de tensiune sînt cunoscute și anume axială (radială pentru plăcile plane) și circumferențială.

Fiecare element al structurii este solicitat la întindere cu eforturile N și la încovoiere cu eforturile M. La acestea se adaugă tensiunile termice de membrană și de încovoiere, care pentru unele din elemente s-au determinat separat. În forma cea mai generală, relația de calcul a tensiunilor adimensionale este

$$\bar{\sigma} = \bar{N} \pm 6\,\bar{M} + \Delta\,\bar{\sigma}. \tag{3.12}$$

în care $\Delta\bar{\sigma}$ este termenul corespunzător tensiunilor termice. Relația (3.12) se scrie separat pentru fiecare direcție principală a stării de tensiune, luînd termenii pentru direcția respectivă.

Se calculează numai tensiunile din punctele de pe suprafețele elementelor, unde acestea au valori maxime. În expresiile respective semnele situate deasupra corespund punctelor de pe suprafața interioară a elementului, iar cele situate dedesubt, punctelor de pe suprafața exterioară.

Expresiile finale ale tensiunilor adimensionale, definite prin relația (3.5″), se dau în cele ce urmează, pentru cele șapte tipuri de elemente care s-au studiat.

3.3.1. *Tensiunile adimensionale pentru placa plană circulară (PLA)*

Înlocuind succesiv în relația (3.12) termenii corespunzători, dați de relațiile (2.2), (2.6), (2.9) și de prima relație (2.23), respectiv (2.3), (2.7), (2.10) și de a doua relație (2.23), se obține

$$\bar{\sigma}_\rho(\eta) = \frac{1}{8}(3+\mu)(1-\eta^2)\,\bar{\omega} + \bar{N}_R^{(1)} + \alpha\left[T_0(1) - \frac{1}{\eta^2}\,T_0(\eta)\right] \pm$$
$$\pm 6\left\{\bar{M}_R^{(1)} + \frac{\alpha}{12}\,[T_2(\eta) - T_2(1)] + \frac{1}{8}(3+\mu)(1-\eta^2)\,\frac{R}{H}\,\bar{p}\right\} \tag{3.13}$$

$$\bar{\sigma}_t(\eta) = \frac{1}{8}(3+\mu)\left(1 - \frac{1+3\mu}{3+\mu}\eta^2\right)\bar{\omega} + \bar{N}_R^{(1)} + \alpha\left[T_0(1) + \right. \tag{3.13}$$

$$\left. + \frac{1}{\eta^2}T_0(\eta) - T(\eta)\right] \pm 6\left\{\bar{M}_R^{(1)} + \frac{\alpha}{12}[T_3(\eta) - T_2(1)] + \right.$$

$$\left. + \frac{3+\mu}{8}\left(1 - \frac{1+3\mu}{3+\mu}\eta^2\right)\frac{R}{H}\bar{p}\right\}.$$

3.3.2. *Tensiunile adimensionale pentru placa plană inelară (PLI)*

Avînd în vedere relaţia (2.48) şi primele din relaţiile (2.33), (2.38) şi (2.55), respectiv relaţia (2.49) şi celelalte relaţii din grupul (2.33), (2.38), (2.55) rezultă

$$\bar{\sigma}_\rho(\eta) = \frac{1}{\beta^2-1}\left[\beta^2\bar{N}_R^{(\beta)} - \bar{N}_r^{(1)} - \frac{\beta^2}{\eta^2}(\bar{N}_R^{(\beta)} - \bar{N}_r^{(1)})\right] + \alpha T_4(\beta,\ \eta) +$$

$$+ u_1(\mu, \beta, \eta)\,\bar{\omega} \pm 6\left\{\frac{1}{\beta^2-1}\left[\alpha T_6(\beta, \eta) + \beta^2\left(1 - \frac{1}{\eta^2}\right)\bar{M}_R^{(\beta)} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \left(\frac{\beta^2}{\eta^2} - 1\right)\bar{M}_r^{(1)}\right] + \bar{P}\frac{R}{H}u_3(\mu, \beta, \eta) + \bar{p}\frac{R}{H}u_5(\mu, \beta, \eta)\right\} \tag{3.14}$$

$$\bar{\sigma}_t(\eta) = \frac{1}{\beta^2-1}\left[\beta^2\bar{N}_R^{(\beta)} - \bar{N}_r^{(1)} + \frac{\beta^2}{\eta^2}(\bar{N}_R^{(\beta)} - \bar{N}_r^{(1)})\right] + \alpha T_5(\beta, \eta) +$$

$$+ u_2(\mu, \beta, \eta)\,\bar{\omega} \pm 6\left\{\frac{1}{\beta^2-1}\left[\alpha T_7(\beta, \eta) + \beta^2\left(1 + \frac{1}{\eta^2}\right)\bar{M}_R^{(\beta)} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \left(1 + \frac{\beta^2}{\eta^2}\right)\bar{M}_r^{(1)}\right] + \bar{P}\frac{R}{H}u_4(\mu, \beta, \eta) + \bar{p}\frac{R}{H}u_6(\mu, \beta, \eta)\right\}.$$

Pentru elemente de tipul PLI01, în relaţiile (3.14) se înlocuiesc

$$\bar{N}_r^{(1)} = \bar{M}_r^{(1)} = 0 \tag{3.15'}$$

Scanned with OKEN Scanner

iar pentru elemente de tipul PLI10,

$$\bar{N}_R^{(\beta)} = \bar{M}_R^{(\beta)} = 0. \tag{3.15''}$$

3.3.3. *Tensiunile adimensionale pentru învelişul cilindric lung (CIL)*

Considerînd relaţia (2.63), a doua relaţie (2.66) şi prima relaţie (2.77), respectiv relaţiile (2.71) şi a doua relaţie (2.77), se obţine

$$\bar{\sigma}_x(\xi) = \bar{\zeta} \pm \left\{ \frac{3}{2\sqrt{3(1-\mu^2)}} [2e^{-\xi}(-\bar{C}_1 \cos\xi + \bar{C}_2 \sin\xi) + \alpha T_2(\xi)] + \right.$$

$$\left. + \frac{\alpha \Delta T}{2(1-\mu)} [e^{-\xi}(\cos\xi + \sin\xi) - 1] \right\}$$

$$\bar{\sigma}_\varphi(\xi) = e^{-\xi}(\bar{C}_1 \sin\xi + \bar{C}_2 \cos\xi) + \bar{w}^*(\xi) + \mu\,\bar{\sigma}_x(\xi) \pm \tag{3.16}$$

$$\pm \frac{\alpha \Delta T}{2(1-\mu)} \left\{ \left[\pm \frac{1}{3}\sqrt{3(1-\mu^2)}\,(\cos\xi - \sin\xi) - \mu(\cos\xi + \sin\xi) \right] e^{-\xi} + 1 \right\}$$

în care s-a notat

$$\bar{\zeta} = \bar{p} c_p + \bar{P} + \bar{\omega}\, c_\omega c_x. \tag{3.17}$$

3.3.4. *Tensiunile adimensionale pentru învelişul cilindric scurt (CIS)*

Se înlocuiesc în relaţia (3.12) expresiile (2.79), (2.80''') şi primele din (2.103), (2.110), (2.115), respectiv (2.71) şi ultimele din (2.103), (2.110), (2.115):

$$\bar{\sigma}_x(\xi) = \bar{\zeta} \pm \left\{ \frac{3}{2\sqrt{3(1-\mu^2)}} [-4\bar{C}_1 V_3(\xi) - 4\bar{C}_2 V_4(\xi) + \bar{C}_3 V_1(\xi) + \right.$$

$$\left. + \bar{C}_4 V_2(\xi) + \alpha\, T_2(\xi)] + \Delta\,\bar{\sigma}_x(\xi) \right\} \tag{3.18}$$

$$\bar{\sigma}_\varphi(\xi) = \left[\sum_{i=1}^{4} \bar{C}_i V_i(\xi) + \bar{w}^*(\xi) \right] + \mu\,\bar{\sigma}_x(\xi) + \Delta\,\bar{\sigma}_\varphi(\xi)$$

Scanned with OKEN Scanner

în care :

— pentru elemente de tipurile CIS11, CIS01, CIS10

$$\Delta\bar{\sigma}_x(\xi) = \chi_1(\xi, \lambda, \mu)\,\alpha\,\Delta T$$
$$\Delta\bar{\sigma}_\varphi(\xi) = [\chi_2(\xi, \lambda, \mu) \pm \chi_3(\xi, \lambda, \mu)]\,\alpha\,\Delta T; \tag{3.19}$$

— pentru elemente de tipul CIS21

$$\Delta\bar{\sigma}_x(\xi) = \chi_{10}(\xi, \lambda, \mu)\,\alpha\,\Delta T$$
$$\Delta\bar{\sigma}_\varphi(\xi) = [\chi_8(\xi, \lambda, \mu) \pm \chi_{11}(\xi, \lambda, \mu)]\,\alpha\,\Delta T; \tag{3.20}$$

— pentru elemente de tipul CIS12

$$\Delta\bar{\sigma}_x(\xi) = \chi_4(\xi, \lambda, \mu)\alpha\,\Delta T$$
$$\Delta\bar{\sigma}_\varphi(\xi) = [\chi_5(\xi, \lambda, \mu) \pm \chi_6(\xi, \lambda, \mu)]\alpha\,\Delta T. \tag{3.21}$$

De asemenea în relațiile (3.18) se fac următoarele înlocuiri :

— pentru elemente de tipul CIS01 (v. relațiile (2.84))

$$\bar{C}_3 = -\alpha\,T_2(0)$$
$$\bar{C}_4 = -\alpha\,T_3; \tag{3.22}$$

— pentru elemente de tipul CIS 21 (v. relațiile (2.86))

$$\bar{C}_2 = -\alpha\,T_1(0)$$
$$\bar{C}_4 = -\alpha\,T_3; \tag{3.23}$$

— pentru elemente de tipul CIS10 (v. relațiile (2.90))

$$\bar{C}_3 = 4U_7(\lambda)\,\bar{C}_1 + 4U_8(\lambda)\,\bar{C}_2 + \alpha[U_{12}(\lambda)\,T_3 - U_{11}(\lambda)\,T_2(\lambda)]$$
$$\bar{C}_4 = 4U_9(\lambda)\,\bar{C}_1 - 4U_7(\lambda)\,\bar{C}_2 - \alpha[U_{11}(\lambda)T_3 + 4U_{13}(\lambda)T_2(\lambda)]; \tag{3.24}$$

— pentru elemente de tipul CIS12 (v. relațiile (2.95))

$$\bar{C}_3 = -4U_1(2\lambda)\,\bar{C}_1 - U_{15}(\lambda)\,\bar{C}_2 - \alpha[U_{18}(\lambda)\,T_1(\lambda) - U_{19}(\lambda)\,T_3]$$
$$\bar{C}_4 = 4U_{16}(\lambda)\,\bar{C}_1 + 4U_1(2\lambda)\,\bar{C}_2 + \alpha[4U_5(\lambda)\,T_1(\lambda) - U_6(\lambda)\,T_3]. \tag{3.25}$$

Scanned with OKEN Scanner

3.3.5. *Tensiunile adimensionale pentru învelişul conic (CON)*

Relaţia (3.12) devine, cu notaţiile folosite la învelişul conic,

$$\bar{\sigma}_x = \bar{N}_x \pm 6\bar{M}_x\,; \quad \bar{\sigma}_\psi = \bar{N}_\psi \pm 6\bar{M}_\psi \tag{3.26}$$

efectele solicitărilor termice fiind incluse în expresiile eforturilor $\bar{N}_{x,\psi}$ şi $\bar{M}_{x,\psi}$.

Eforturile $\bar{N}_{x,\psi}$ şi $\bar{M}_{x,\psi}$ se obţin din relaţiile (2.142) în care se introduc mărimile adimensionale definite în paragraful 3.1 :

$$\begin{aligned}
\bar{N}_x(\xi) &= \bar{N}_x^*(\xi) - \frac{\beta}{\xi}[\bar{C}_1 X_3(\xi) + \bar{C}_2 X_4(\xi) + \bar{C}_3 Y_3(\xi) + \bar{C}_4 Y_4(\xi)] \\
\bar{N}_\psi(\xi) &= \bar{N}_\psi^*(\xi) - \frac{\beta}{\xi}[\bar{C}_1 Y_6(\xi) + \bar{C}_2 Y_7(\xi) + \bar{C}_3 Y_8(\xi) + \bar{C}_4 Y_9(\xi)]
\end{aligned} \tag{3.27}$$

$$\begin{aligned}
\bar{M}_x(\xi) &= \frac{1}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\frac{\beta}{\xi}[\bar{C}_1 Y_8(\xi) + \bar{C}_2 Y_9(\xi) - \bar{C}_3 Y_6(\xi) - \\
&\quad - \bar{C}_4 Y_7(\xi)] + M_x^*(\xi) \\
\bar{M}_\psi(\xi) &= \frac{1}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\frac{\beta}{\xi}[\bar{C}_1 X_8(\xi) + \bar{C}_2 X_9(\xi) - \bar{C}_3 X_6(\xi) - \\
&\quad - \bar{C}_4 X_7(\xi)] + \bar{M}_\psi^*(\xi)
\end{aligned}$$

în care se vor face următoarele înlocuiri :

— pentru elemente de tipurile CON10X şi CONX01 (v. relaţiile (2.144))

$$\begin{aligned}
\bar{C}_3 &= \bar{C}_1 z_1(\beta,\mu) + \bar{C}_2 z_2(\beta,\mu) + z_6(\beta,\mu)\bar{M}_x^*(\beta) + z_8(\beta,\mu)\,\bar{S}^*(\beta)\cos\varphi \\
\bar{C}_4 &= -\bar{C}_1 z_3(\beta,\mu) - \bar{C}_2 z_4(\beta,\mu) - z_5(\beta,\mu)\,\bar{M}_x^*(\beta) - z_7(\beta,\mu)\bar{S}^*(\beta)\cos\varphi\,;
\end{aligned} \tag{3.28}$$

— pentru elemente de tipurile CON01X şi CONX10 (v. relaţiile (2.148))

$$\begin{aligned}
\bar{C}_3 &= \bar{C}_1 z_1(1,\mu) + \bar{C}_2 z_2(1,\mu) + \frac{1}{\beta}[z_6(1,\mu)\,\bar{M}_x^*(1) + z_8(1,\mu)\,\bar{S}^*(1)\cos\varphi] \\
\bar{C}_4 &= -\bar{C}_1 z_3(1,\mu) - \bar{C}_2 z_4(1,\mu) - \frac{1}{\beta}[z_5(1,\mu)\,\bar{M}_x^*(1) + z_7(1,\mu)\,\bar{S}^*(1)\cos\varphi].
\end{aligned} \tag{3.29}$$

3.3.6. *Tensiunile adimensionale pentru învelișul sferic cu două margini (SFE)*

Cu notațiile folosite la învelișul sferic, relația (3.12) devine

$$\bar{\sigma}_\varphi = \bar{N}_\varphi \pm 6\bar{M}_\varphi\,;\quad \bar{\sigma}_\psi = \bar{N}_\psi \pm 6\bar{M}_\psi, \tag{3.30}$$

relații analoge cu (3.26) de la învelișul conic.

Expresiile eforturilor $\bar{N}_{\varphi,\psi}$, $\bar{M}_{\varphi,\psi}$ se obțin din relațiile (2.159), sub forma

$$\begin{aligned}
\bar{N}_\varphi(\varphi) &= \bar{N}^*_\varphi(\varphi) - [\bar{C}_1 X_1(\varphi) + \bar{C}_2 X_2(\varphi) + \bar{C}_3 Y_1(\varphi) + \bar{C}_4 Y_2(\varphi)]\operatorname{cotg}\varphi \\
\bar{N}_\psi(\varphi) &= \bar{N}^*_\psi(\varphi) - \left(\bar{C}_1 \frac{\mathrm{d}X_1}{\mathrm{d}\varphi} + \bar{C}_2 \frac{\mathrm{d}X_2}{\mathrm{d}\varphi} + \bar{C}_3 \frac{\mathrm{d}Y_1}{\mathrm{d}\varphi} + \bar{C}_4 \frac{\mathrm{d}Y_2}{\mathrm{d}\varphi}\right),
\end{aligned} \tag{3.31}$$

$$\begin{aligned}
\bar{M}_\varphi(\varphi) = \frac{1}{12(1-\mu^2)}\frac{h}{R}[&\bar{C}_1 X_{11}(\varphi) + \bar{C}_2 X_{12}(\varphi) - \\
&- \bar{C}_3 X_{13}(\varphi) - \bar{C}_4 X_{14}(\varphi)] + \bar{M}^*_\varphi(\varphi) \\
\bar{M}_\psi(\varphi) = \frac{1}{12(1-\mu^2)}\frac{h}{R}[&\bar{C}_1 Y_{11}(\varphi) + \bar{C}_2 Y_{12}(\varphi) - \\
&- \bar{C}_3 Y_{13}(\varphi) - \bar{C}_4 Y_{14}(\varphi)] + \bar{M}^*_\psi(\varphi),
\end{aligned}$$

în care se fac următoarele înlocuiri:

— pentru elemente de tipurile SFE01X și SFEX10 (v. relațiile (2.171))

$$\begin{aligned}
\bar{C}_3 &= -\bar{C}_1 z_{11}(\varphi_2) - \bar{C}_2 z_{12}(\varphi_2) - z_{16}(\varphi_2)\,\bar{M}^*_\varphi(\varphi_2) - z_{18}(\varphi_2)\,\bar{S}^*(\varphi_2) \\
\bar{C}_4 &= \bar{C}_1 z_{13}(\varphi_2) + \bar{C}_2 z_{14}(\varphi_2) + z_{15}(\varphi_2)\,\bar{M}^*_\varphi(\varphi_2) + z_{17}(\varphi_2)\,\bar{S}^*(\varphi_2);
\end{aligned} \tag{3.32}$$

— pentru elemente de tipurile SFE10X și SFEX01, se înlocuiește în relațiile (3.32) φ_2 prin φ_1.

3.3.7. *Tensiunile adimensionale pentru învelișul sferic cu o margine (SFC)*

Relațiile (3.30) și (3.31) de la învelișul sferic cu două margini rămîn valabile, dacă în acestea se înlocuiește

$$\bar{C}_2 = \bar{C}_4 = 0. \tag{3.33}$$

Capitolul IV

Elementele limbajului STAXIS

4.1. Descrierea generală a limbajului

STAXIS este un limbaj specializat pentru calculul tensiunilor în structuri axial simetrice formate din plăci plane și curbe subțiri. În esență el este un analizor sintactic, care identifică un ansamblu de instrucțiuni tipice, verifică succesiunea logică a acestora, precum și corectitudinea modului în care a fost scrisă fiecare instrucțiune în parte. Analiza conținutului unei instrucțiuni este urmată de o serie de operații logice și de calcul, specifice instrucțiunii respective.

La elaborarea limbajului s-a urmărit ca acesta să fie cît mai simplu și intuitiv, astfel încît informația pe care utilizatorul o transmite calculatorului să fie numai cea strict necesară, formulată într-o formă cît mai apropiată de limbajul inginerese obișnuit.

Toate comenzile, instrucțiunile și datele ce se transmit calculatorului prin intermediul limbajului STAXIS sînt trecute printr-un filtru dens de verificări riguroase, care fac practic imposibilă utilizarea greșită a programului. Pentru fiecare eroare constatată calculatorul transmite informații privind locul unde s-a comis eroarea și în ce constă ea. Aceasta permite identificarea și înlăturarea cu ușurință a tuturor erorilor.

De asemenea s-a căutat să se asigure limbajului o cît mai mare suplețe. În acest scop toate instrucțiunile se scriu în format liber, cu posibilitatea ca fiecare instrucțiune să fie continuată — dacă este

Scanned with OKEN Scanner

necesar — şi de un comentariu. Trebuie avut grijă însă ca între ultimul caracter al instrucţiunii propriu-zise şi primul caracter al comentariului să existe cel puţin un blank. Ordinea scrierii instrucţiunilor are un număr mic de restricţii, impuse de nivelul la care se prelucrează informaţiile respective şi nu de structura propriu-zisă a limbajului. S-au prevăzut un număr de declaraţii şi instrucţiuni opţionale care permit utilizatorului să aleagă modalitatea cea mai simplă şi cea mai adecvată pentru introducerea datelor, efectuarea calculelor dorite şi redactarea rezultatelor obţinute.

Construcţia limbajului STAXIS a fost determinată de observaţia că pentru rezolvarea unei structuri, calculatorului îi sînt necesare informaţii care se ierarhizează prin însăşi subiectul lor, alcătuind trei grupe distincte şi independente şi anume :

a) Informaţii privind descrierea „calitativă" a structurii : se precizează tipurile elementelor care compun structura şi modul în care acestea se *leagă* pentru a forma ansamblul.

b) Informaţii privind descrierea „cantitativă" a structurii : se precizează valorile parametrilor care definesc geometria, materialul şi sarcinile pentru fiecare din elementele care compun structura,

c) Informaţii asupra calculelor care utilizatorul doreşte să fie executate şi a modului de afişare a rezultatelor obţinute.

Pentru o structură dată, este necesar să se scrie un număr oarecare de instrucţiuni în vederea codificării informaţiilor din cele trei grupe enumerate mai sus ; calculatorul însă nu ştie apriori numărul instrucţiunilor şi al cartelelor pe care sînt scrise. Din acest motiv a fost necesară introducerea unor instrucţiuni *de comandă* care asigură trecerea programului la „starea" corespunzătoare prelucrării informaţiilor din grupa respectivă. Să denumim aceste „stări" a, b, c.

Este evident că în aceste condiţii instrucţiunile trebuie să respecte succesiunea a — b — c, orice abatere de la această regulă fiind semnalată ca o eroare de sintaxă. De asemenea, programul nu va accepta instrucţiuni dintr-o grupă oarecare (de exemplu c) cînd el se află într-o altă „stare" (de exemplu a sau b).

4.2. Instrucţiunile de comandă

Instrucţiunile de comandă ale limbajului STAXIS încep cu un asterisc (*). Comanda propriu-zisă poate fi scrisă pe cartelă în orice poziţie, dar fără blankuri intercalate între caractere.

Prima instrucţiune de comandă este

```
*    STRUCTURA    [COMENTARII]
```


Scanned with OKEN Scanner

Ea asigură trecerea programului în starea a, inițializează unele din tablourile de variabile și unii indicatori și cheamă subprogramul care citește, analizează și prelucrează instrucțiunile privind descrierea „calitativă" a structurii.

După citirea tuturor instrucțiunilor din grupa a, urmează instrucțiunea de comandă.

$$* \text{ DATE } \left\{ \begin{matrix} \text{METRIC} \\ \text{ADIM} \end{matrix} \right\} \text{ [COMENTARII]}$$

care permite introducerea datelor care descriu „cantitativ" structura, adică a valorilor parametrilor elementelor structurii care definesc geometria, materialul și sarcinile (v. tabelul 3.1). Ea asigură trecerea programului în starea b.

Comanda arată că datele ce se introduc prin intermediul instrucțiunilor ce îi urmează sînt valori ale mărimilor respective măsurate în sistemul metric de unități de măsură sau sînt mărimi adimensionale, așa cum s-au definit în tabelul 3.1.

Urmează instrucțiunea de comandă

$$* \text{ REZOLVA } \quad \text{[COMENTARII]}$$

care transmite calculatorului informația că s-a epuizat șirul instrucțiunilor care au definit „calitativ" și „cantitativ" structura și că trebuie efectuate calculele. Urmează determinarea valorilor parametrilor adimensionali, dacă s-au introdus datele în sistemul metric, sau nu se mai face acest calcul dacă datele au fost adimensionale. În continuare se completează matricea coeficienților și cea a termenilor liberi ai sistemului de ecuații al constantelor de integrare și se rezolvă acest sistem. Programul trece în starea c.

Instrucțiunile care urmează transmit informații privind elementele și punctele în care utilizatorul dorește să se calculeze tensiunile, precum și opțiuni privind modul de afișare a rezultatelor obținute.

După epuizarea șirului instrucțiunilor de calcul și afișare a tensiunilor, poate fi folosită una din următoarele instrucțiuni de comandă, după necesități:

— instrucțiunea * DATE, dacă se dorește să se studieze variante ale structurii inițiale, modificînd unele valori ale parametrilor elementelor structurii. Pentru aceasta este suficient să se scrie instrucțiuni corespunzătoare pentru parametrii care se modifică, ceilalți păstrîndu-și valorile definite la varianta anterioară;

— instrucțiunea * STRUCTURA, dacă utilizatorul dorește să se rezolve o structură nouă. Ea va fi urmată de seturi de instrucțiuni corespunzătoare;

Scanned with OKEN Scanner

— instrucţiunea

* STOP

care transmite calculatorului informaţia că lucrul cu programul STAXIS s-a terminat.

Posibilitatea efectuării „în lanţ" a calculului mai multor variante a unei structuri reduce timpul de execuţie prin aceea că nu se mai citesc toate cartelele care definesc structura, iar o parte din calculele efectuate la varianta anterioară nu se reiau.

De asemenea, succesiunea neîntreruptă a mai multor structuri diferite reduce timpul de execuţie mai ales în cazul cînd se lucrează cu programul segmentat.

4.3. Instrucţiunile de descriere a structurii

Descrierea „calitativă" a structurii se face imediat după o comandă * STRUCTURA. Mai întîi se descriu elementele componente ale structurii, folosind un set de instrucţiuni, precedat de o declaraţie de forma

ELEMENTE [COMENTARII]

după care urmează, pentru fiecare element, cîte o instrucţiune de forma

MM XXX YYY [COMENTARII]

în care :

MM reprezintă una sau două cifre şi este numărul (identificatorul) elementului ;

XXX — simbol format din trei litere care indică tipul elementului, ca în tabelul 3.2 (coloana 1) ;

YYY — simbol format din două sau trei caractere (litere şi cifre) care indică indicii de „stare" ai marginilor elementului, ca în tabelul 3.2 (coloana 2).

Pentru descrierea „legăturilor" elementelor, adică a modului în care acestea sînt asamblate pentru a forma structura dată, se foloseşte un alt set de instrucţiuni, precedat de o declaraţie de forma

LEGATURI [COMENTARII]

după care urmează, pentru fiecare contur de asamblare a două sau mai multe elemente ale structurii cîte o instrucţiune de forma

$$NN \quad MM \left[\left\{\begin{matrix} I \\ E \end{matrix}\right\}\right], \quad MM \left[\left\{\begin{matrix} I \\ E \end{matrix}\right\}\right], \ldots, MM \left[\left\{\begin{matrix} I \\ E \end{matrix}\right\}\right]$$

Scanned with OKEN Scanner

în care:

NN reprezintă una sau două cifre şi este numărul (identificatorul) conturului de legătură;

MM — numărul elementului care participă la legătura respectivă;

I sau E sînt caractere care urmează numerele elementelor care au două margini de legătură şi indică marginea care participă la legătura respectivă. Aceste notaţii se află înscrise pe schiţele elementelor respective din tabelul 3.2 (coloana 3).

În cadrul fiecărei instrucţiuni numerele elementelor se separă prin virgulă.

Se prezintă, spre exemplificare, modul de scriere a instrucţiunilor care descriu elementele şi legăturile pentru structura din figura 4.1, sugerată de lucrarea [36].

După descompunerea structurii în elemente, acestea se numerotează (cifrele înscrise în cerculeţe) într-o ordine arbitrară, cu cifre între 1 şi 15 inclusiv. Cu ajutorul tabelului 3.2 se identifică tipul fiecărui element şi se determină simbolul corespunzător. Instrucţiunile sînt

ELEMENTE
1 CIL 1X
2 CON X11
3 CON 01X
4 CON 11X
5 CON 01X
6 CIS 11
7 CON X01

Un subprogram al limbajului STAXIS analizează instrucţiunile, identifică simbolurile elementelor şi completează două tabele în care se alocă codul de tip, respectiv codul „stărilor" marginilor elementului (cod de subtip). Ordinea de completare a acestor tabele este cea în care au fost numerotate elementele.

Dacă se comit erori la scrierea instrucţiunilor, de exemplu dacă simbolurile elementelor sînt alterate, se tipăreşte un I sub caracterul greşit al simbolului şi pe rîndul următor se scrie

** ECMM

în care MM este un număr care indică, în lista mesajelor de eroare, tipul erorii. Se semnalează o singură eroare într-o instrucţiune.

Scanned with OKEN Scanner

Apoi se numerotează (cifrele înscrise în pătrate pe figura 4.1), într-o ordine oarecare, contururile pe care se „leagă" elementele pentru a constitui structura dată.

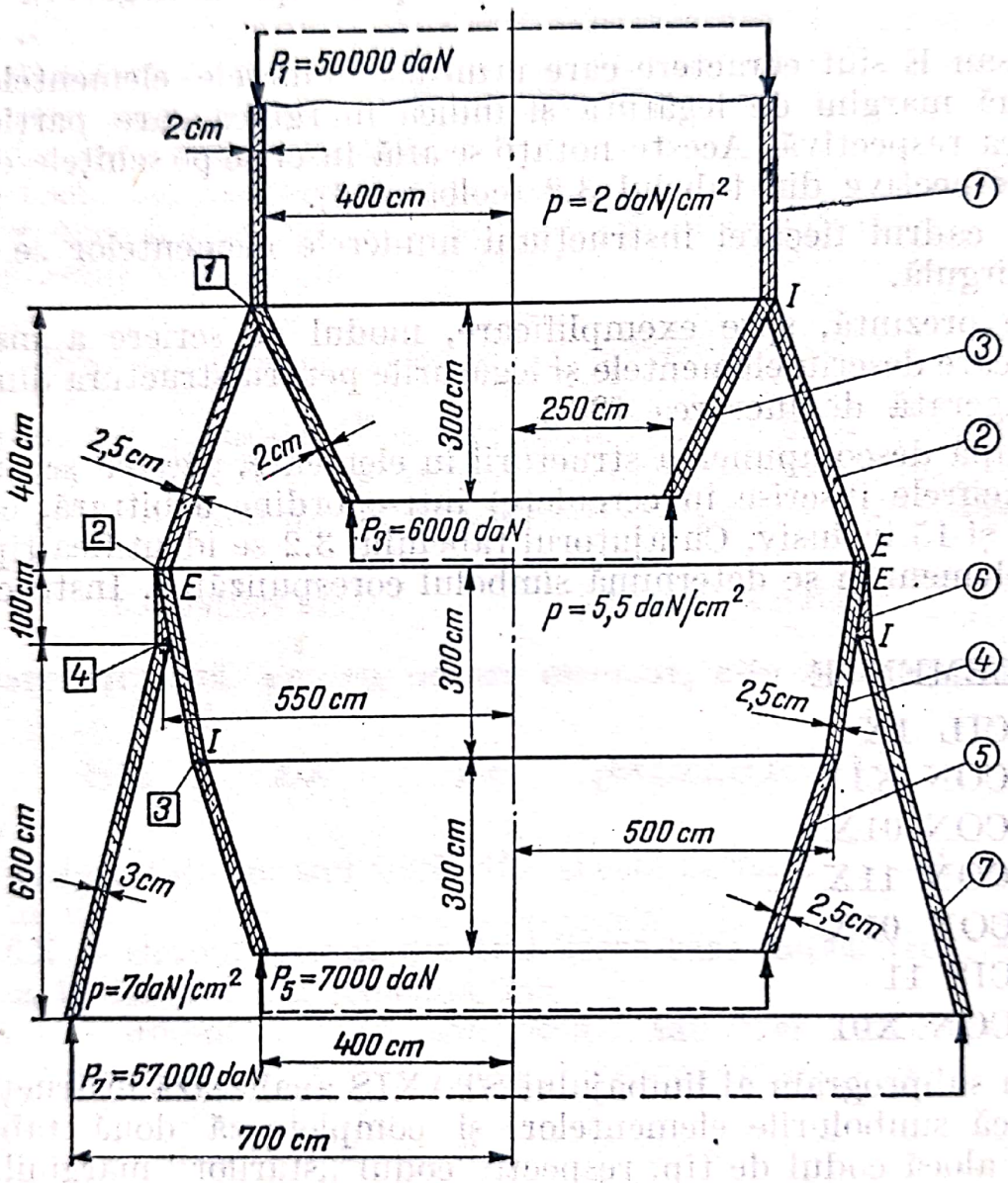


Fig. 4.1

Pentru exemplul din figura 4.1 aceste instrucţiuni sînt

LEGĂTURI

1 2,21I,3
2 6E, 4E, 2E
3 4I,5
4 6I,7

Scanned with OKEN Scanner

Pentru elementele care au două margini de legătură (în cazul de faţă 2, 4, 6) s-a identificat, cu ajutorul schiţelor din tabelul 3.2, dacă o anumită margine este de tip I sau E.

În cadrul fiecărei instrucţiuni ordinea în care sînt scrise numerele elementelor este arbitrară, adică, de exemplu, instrucţiunile se puteau scrie şi sub forma

LEGĂTURI

1 2I, 1,3 sau 2I, 3, 1 sau 3, 1, 2I etc.
2 2E, 4E, 6E sau 2E, 6E, 4E sau 4E, 6E, 2E etc.
3 5, 4I
4 7, 6I

În urma analizei legăturilor programul verifică dacă fiecare element este legat corespunzător, adică dacă elementele cu o margine „activă" participă numai la o legătură, iar cele cu două margini participă cu o legătură de tip I şi una de tip E. Se semnalează (aşa cum s-a arătat la analiza elementelor) dacă sînt elemente fără legături sau dacă sînt scrise pentru un element mai multe legături decît cele corecte.

Pentru fiecare instrucţiune fără erori calculatorul completează, pentru fiecare element, cîte o linie (dacă elementul este cu o margine „activă") sau cîte două linii (dacă elementul este cu două margini „active") în tabele care arată: numărul conturului de legătură, numărul elementelor care se leagă pe conturul respectiv şi rangul elementului în şirul care defineşte legătura. Ulterior, în faza de execuţie a calculelor, prelucrarea acestor informaţii, precum şi a celor din tabelele de tip şi subtip (ale elementelor), permit completarea riguroasă a matricei coeficienţilor şi a termenilor liberi ai sistemului de ecuaţii al constantelor de integrare.

Succesiunea instrucţiunilor care definesc elementele sau legăturile poate fi arbitrară, fiecare din acestea putînd conţine şi un comentariu. Nu este permisă alternarea celor două tipuri de instrucţiuni.

4.4. Instrucţiunile de definire a valorilor parametrilor

Pentru a fi posibilă efectuarea calculelor numerice este necesar să se introducă în calculator toate informaţiile privind caracteristicile materialului, dimensiunile şi sarcinile fiecărui element al structurii. Aceasta se face prin instrucţiuni care urmează comenzii * DATE.

Scanned with OKEN Scanner

Se menţionează că datele se introduc sub forma unor modificări ale unei situaţii anterioare, adică definirea valorii unui parametru înseamnă înlocuirea vechii valori cu cea specificată pentru parametrul respectiv. Iniţial, la definirea structurii (după o comandă *STRUCTURA), toţi parametrii, pentru toate elementele, sînt puşi pe zero. Pentru parametrii ne-nuli se scriu instrucţiuni prin intermediul cărora se introduc valorile corespunzătoare. Valoarea unui parametru oarecare poate fi schimbată de mai multe ori, valoarea sa finală — care va fi utilizată în calcul — fiind ultima valoare atribuită acelui parametru.

Pentru definirea acelor parametri care au aceeaşi valoare pentru toate elementele structurii se poate utiliza o instrucţiune opţională de forma

CONSTANTE MM = YYY, MM = YYY,..., MM = YYY

în care :

MM reprezintă una sau două cifre şi este rangul parametrului metric sau adimensional (funcţie de declaraţia din comanda * DATE) aşa cum rezultă din tabelul 3.1 ;

YYY — valoarea parametrului. Ea urmează după semnul=, separarea parametrilor făcîndu-se prin virgulă. Valorile parametrilor pot fi întregi sau zecimale, scrise în cod F sau E.

De exemplu instrucţiunea

CONSTANTE 1 = 0.3,3 = 2.1E6,10 = 5.5

arată că toate elementele structurii au pentru primul parametru valoarea 0.3; pentru al doilea valoarea 2.1×10^6 etc.

Pentru celelalte valori ale parametrilor, specifice fiecărui element al structurii, se scriu instrucţiuni de forma

NN MM = YYY, MM = YYY, ..., MM = YYY

cîte una pentru fiecare element, în care :

NN reprezintă una sau două cifre şi este numărul elementului ;

MM — rangul parametrului în lista de parametri (tabelul 3.1) ai elementului de tipul la care se face referirea ;

YYY — valoarea parametrului, întreagă sau zecimală, scrisă în cod F sau E.

La scrierea acestor instrucţiuni trebuie avut în vedere dacă parametrii sînt metrici sau adimensionali.

Deoarece numărul maxim de parametri este destul de mare (22 pentru elemente de tip SFE), poate apare necesitatea utilizării mai multor cartele pentru scrierea unei instrucţiuni. Pentru aceasta tre-

Scanned with OKEN Scanner

buie ca ultimul caracter definit pe cartela care se continuă să fie o virgulă, adică şirul scris pe cele două cartele va avea forma

NN MM = YYY, ..., MM = YYY, (prima cartelă)

MM = YYY, ..., MM = YYY (a doua cartelă)

semnificaţiile notaţiilor, NN, MM, YYY fiind cele definite mai sus.

Se menţionează că într-o instrucţiune de definire a parametrilor poate fi trecută valoarea unui parametru care a figurat în instrucţiunea CONSTANTE, dacă pentru elementul respectiv el are altă valoare.

De exemplu, dacă parametrul 3 are valoarea 2.1×10^6 pentru întreaga structură, cu excepţia elementului 6, pentru care valoarea este 2.3×10^6, aceasta se poate scrie astfel

CONSTANTE 3 = 2.1E6

6 3 = 2.3E6

4.5. Instrucţiunile pentru calculul tensiunilor şi ale modului de afişare a rezultatelor

Aşa cum s-a arătat la § 4.2, o comandă * REZOLVA are ca efect final determinarea valorilor constantelor de integrare din soluţiile (scrise în deplasări) ecuaţiilor diferenţiale ale fiecărui element al structurii. În acest stadiu de rezolvare al structurii, se pot calcula tensiunile pentru fiecare element, în secţiuni avînd abscisele care interesează, rezultatele obţinute putîndu-se afişa în diverse moduri, după dorinţă.

Pentru a trasmite calculatorului informaţiile corespunzătoare, se utilizează un şir de instrucţiuni de forma

$$NN\left\{\begin{matrix}T\\M\\GK\end{matrix}\right\},\ \left\{\begin{matrix}M\\\\A\end{matrix}\right\},\ \left\{\begin{matrix}PASI\quad YYY,\ XX,\ ZZZ\\\\ABSC\quad VV,VV,\ \ldots,\ VV\end{matrix}\right\}$$

în care :

NN reprezintă una sau două cifre şi este numărul elementului, după care, separată cu un blank, urmează opţiunea pentru tipărirea tensiunilor şi anume :

T — se tipăresc toate tensiunile ce se calculează ;

Scanned with OKEN Scanner

M — din şirul tensiunilor ce se calculează, se tipăreşte numai valoarea maximă a fiecăreia din cele patru tensiuni principale, precum şi abscisa corespunzătoare;

GK — se reprezintă grafic una din tensiunile principale. Pentru K = 1 sau 2 — tensiunile longitudinale, pentru K = 3 sau 4 — tensiunile circumferenţiale, calculate pe suprafaţa interioară a elementului (K = 1 sau 3), respectiv pe suprafaţa exterioară (K = 2 sau 4).

Urmează, separată prin virgulă, opţiunea privind forma în care se introduc valorile absciselor secţiunilor în care se calculează tensiunile:

M — abscise metrice;

A — abscise adimensionale;

PASI — opţiune de calcul a tensiunilor în XX (număr cu una sau două cifre) secţiuni avînd abscise începînd cu valoarea YYY la care se adaugă pasul ZZZ de XX—1 ori;

ABSC — opţiune de calcul a tensiunilor în secţiuni avînd abscisele VV, şirul putînd avea maximum 20 de valori.

Observaţie. Valorile YYY, ZZZ, VV pot fi întregi sau zecimale.

Acest tip de instrucţiune se poate referi de mai multe ori, succesiv, la un acelaşi element, după cum pot fi şi elemente la care nu se face nici o referire, ceea ce permite realizarea unor condiţii şi forme diversificate de redactare a rezultatelor, cît mai adecvate unei anumite necesităţi.

Pentru reprezentarea grafică a tensiunilor (opţiunea GK) se poate folosi imprimanta sistemului de calcul sau o masă trasantă, cuplată cu calculatorul.

Tipărirea tensiunilor maxime este utilă mai ales în cazurile cînd se studiază un număr de variante ale unei structuri, în vederea optimizării formei acesteia, sau în cazurile în care aspectul general al stării de tensiune al structurii în ansamblu este cunoscut, sau nu interesează.

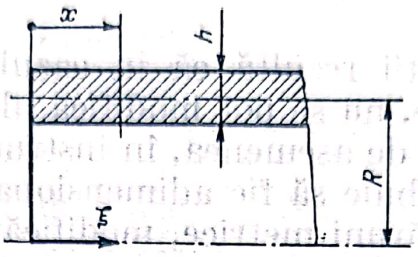
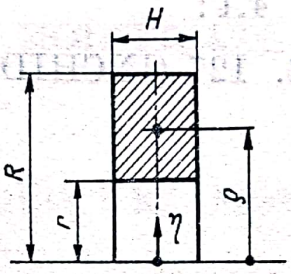
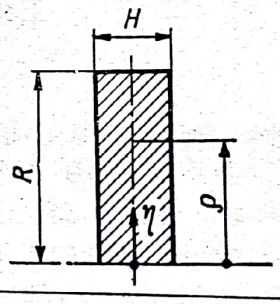
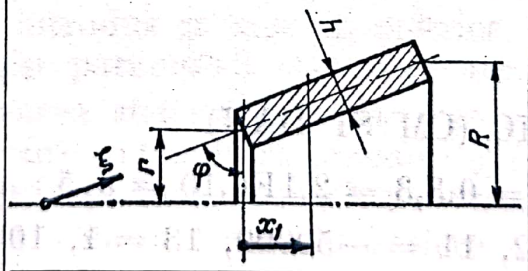
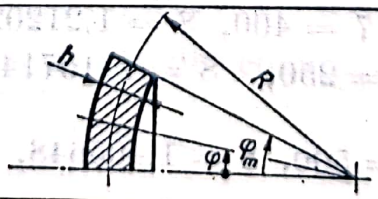
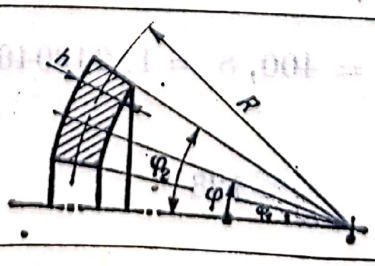
Din considerente care s-au menţionat în cadrul capitolului 3, toate calculele numerice se efectuează funcţie de parametri şi abscise adimensionale. Deci dacă într-o instrucţiune pentru calculul tensiunilor se face opţiunea pentru utilizarea absciselor metrice, calculatorul va calcula abscisele adimensionale corespunzătoare, cu relaţiile din tabelul 4.1. În acest tabel se dau şi schiţele explicative privind definirea celor două tipuri de abscise, pentru toate tipurile de elemente.

Din cele prezentate în cadrul capitolului 3 şi tabelului 4.1 cu privire la modul de definire a mărimilor adimensionale, rezultă că

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 4.1

Expresiile abscisele adimensionale

Tipul elementului	Notaţiile abscisele: Metrică	Notaţiile abscisele: Adimensională	Schiţa explicativă	Expresia abscisei adimensionale
CIS CIL	x	ξ	 1)	$\xi = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\,\frac{x}{R}\sqrt{\frac{R}{h}}$
PLI	ρ	η		$\eta = \frac{\rho}{r}$
PLA				$\eta = \frac{\rho}{R}$
CON	x_1	ξ		$\xi = \frac{x_1}{r\,\mathrm{tg}\,\varphi} + 1$
SFC	$\varphi°$	φ_{rad}		$\varphi_{rad} = \frac{\varphi°}{57.29578}$
SFE				

acestea sînt exprimate, prin relaţii mai mult sau mai puţin complicate funcţie de mărimile metrice. Deci dacă datele şi abscisele sînt introduse ca valori metrice, calculatorul determină valorile adimensionale corespunzătoare. Dimpotrivă dacă se introduc valori adimensionale, acestea se consideră ca atare în calcule, fără să se determine valorile metrice.

Din aceste observaţii rezultă că în cazul introducerii datelor ca mărimi adimensionale, nu se pot modifica ulterior valori ale acestora ca mărimi metrice; de asemenea, în instrucţiuni pentru calculul tensiunilor, abscisele trebuie să fie adimensionale. Dimpotrivă, dacă datele se introduc ca mărimi metrice, modificări ulterioare ale acestora precum şi abscisele pot fi metrice sau adimensionale.

Un set complet de instrucţiuni poate fi următorul, pentru structura reprezentată în figura 4.1:

```
* STRUCTURA NR. 127 (INCHIDERE GURA FURNAL)
  ELEMENTE

1 CIL 1X
2 CON X11
3 CON 01X
4 CON 11X
5 CON 01X
6 CIS 11
7 CON X01

LEGATURI

1 1,2I,3
2 6E, 4E, 2E
3 4I,5
4 6I,7

* DATE METRIC (CM SI DAN)

CONSTANTE 1 = 0.3,3 = 2.1E6,10 = 5.5

1 5 = 400, 6 = 2, 11 = −50000, 13 = 1, 10 = 2
2 5 = 550, 6 = 2.5, 7 = 400, 8 = 1.212026, 11 = −55 000
3 5 = 400, 6 = 2,7 = 250, 8 = 1.107149,10 = −3.5,
11 = − 6000
4 = 550, 6 = 2.5,7 = 500, 8 = 1.405648, 10 = 1.5,
11 = − 5500

5 5 = 500, 6 = 2.5, 7 = 400, 8 = 1. 249046, 10 = −1.5,
11 = − 7000
```


Scanned with OKEN Scanner

```
6 5 = 550,  6 = 3,  7 = 100,  10 = 7,  11 = −53000
7 5 = 700,  6 = 3, 7=550,  8 =1.325818,  10=7,  11=−57000

*  REZOLVA STRUCTURA INITIALA
1 T,M,PASI      0.,33,50.
2 T,M,PASI      0.,41,10.
3 T,M,PASI      0.,31,10.
4 T,M,PASI      0.,31,10.
5 M,M,PASI      0.,31,10.
6 T,M,PASI      0.,41,2.5
7 T,M,PASI      0.,61,10.
2 G1,M,PASI     0.,41,10.
4 G3,M,PASI     0.,31,10.

* DATE METRIC MODIFICATE
1 6 = 2.5,  11 = 0.
7 11 = 0.

* REZOLVA STRUCTURA MODIFICATA
1 T,A,PASI 0.,31,0.1
7 M,A,PASI 1.,28,0.1

* STOP
```

Din observarea şirului de instrucţiuni de mai sus se constată că parametrii 1 (coeficientul de contracţie transversală), 3 (modulul de elasticitate longitudinal) şi 10 (presiunea interioară) s-au definit ca avînd aceeaşi valoare pentru toate elementele. Apoi valoarea presiunii s-a modificat, pentru elementele 3,4,5,6,7.

Datele s-au introdus ca mărimi metrice. Se observă că ordinea în care sînt scrişi parametrii este oarecare.

După rezolvarea structurii iniţiale se calculează o variantă a acesteia, pentru care se modifică grosimea şi forţa P aplicată elementului 1 precum şi forţa P aplicată elementului 7.

S-au utilizat diverse forme de scriere a instrucţiunilor pentru calculul şi afişarea tensiunilor.

Unele din instrucţiunile de comandă conţin comentarii.

Scanned with OKEN Scanner

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul V

Descrierea programului STAXIS

Prezentarea programului STAXIS, în capitolul de faţă, îşi propune să ofere cititorului o imagine de ansamblu a programului, să explice modul în care s-a realizat limbajul specializat şi să descrie principalele subprograme şi secvenţe de calcul pentru structurile axial simetrice.

Pe de altă parte, unele din principiile şi procedurile utilizate în acest program fiind generale, ele pot oferi cititorului posibilitatea ca el însuşi să elaboreze, după dorinţă, alte limbaje specializate şi programe. Este cazul modului de analiză a unei instrucţiuni, a alcătuirii alfabetului limbajului specializat, a realizării conversiei etc.

Din dorinţa de a realiza un program care să poată fi uşor implementat pe o gamă cît mai largă de calculatoare, acesta a fost scris în limbajul BASIC FORTRAN IV, care poate fi interpretat de majoritatea calculatoarelor aflate în dotarea centrelor de calcul din ţara noastră. Trebuie menţionat că, cel puţin pentru subprogramele de analiză şi interpretare a comenzilor, era mai convenabilă utilizarea unui limbaj de asamblare, care este cel mai potrivit pentru astfel de scopuri [3], [20].

5.1. Structura generală a programului

În vederea descrierii cît mai comode şi sugestive, pentru fiecare subprogram se va prezenta organigrama corespunzătoare, detaliată în măsura necesară scopului urmărit. Pentru aceste organigrame s-au

utilizat simbolurile din tabelul 5.1, recomandate de Organizaţia Internaţională pentru Standardizare.

Structura generală a programului STAXIS este reprezentată în figura 5.1.

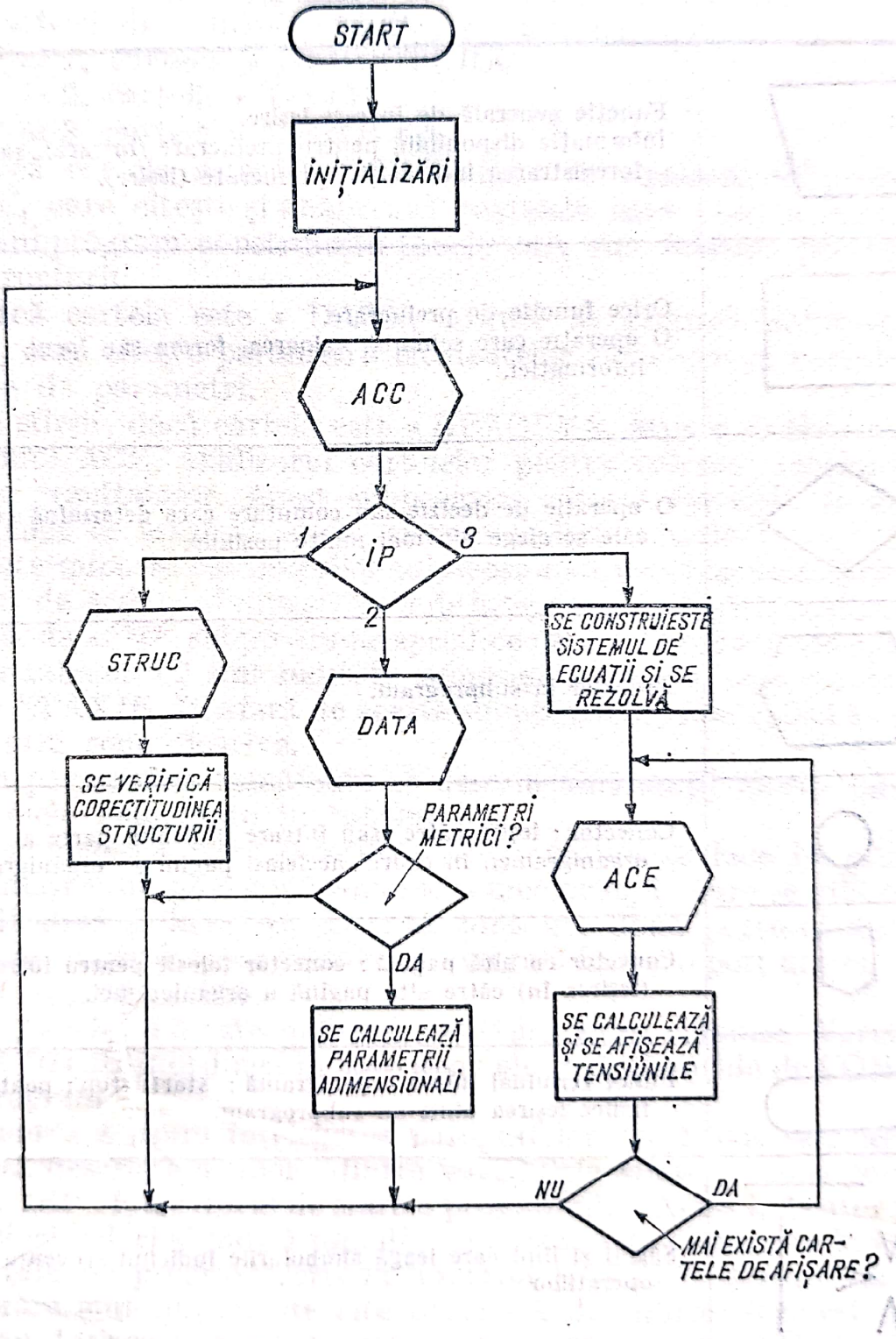
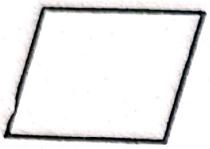
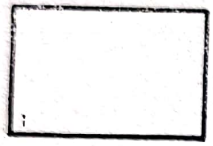
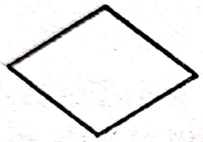
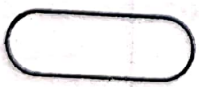
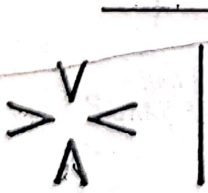


Fig. 5.1.

Tabelul 5.1

Simbolurile folosite pentru organigrame

Simbol	Semnificație
	Funcție generală de intrare-ieșire. Informație disponibilă pentru prelucrare (intrare), sau înregistrarea informației prelucrate (ieșire).
	Orice funcție de prelucrare. O operație care schimbă valoarea, forma sau locul informației.
	O operație de decizie sau comutare care determină ce cale se alege din mai multe posibile.
	Transfer la subprogram.
	Conector : ieșire către (sau intrare din) altă parte a organigramei, în cadrul aceleiași pagini a organigramei.
	Conector cu altă pagină : conector folosit pentru intrarea (ieșirea în) către altă pagină a organigramei.
	Punct terminal într-o organigramă : start, stop ; poate să indice ieșirea dintr-un subprogram.
	Săgeți și linii care leagă simbolurile indicînd secvența operațiilor

Scanned with OKEN Scanner

Subprogramul ACC este analizorul cartelelor de comandă, care încep cu asterisc: * STRUCTURA; * DATE; * REZOLVA; * STOP (v. cap. 4). Acest subprogram poziționează indicatorul IP (indicator de program) pe una din valorile 1, 2 sau 3 în funcție de tipul cartelei de control întîlnite, și anume:

IP = 1, cartelă * STRUCTURA
IP = 2, cartelă * DATE
IP = 3, cartelă * REZOLVA

Dacă cartela este * STRUCTURA, se apelează subprogramul STRUC, care citește și analizează cartelele care descriu structura. Acest subprogram construiește tabele care sînt folosite pentru analiza structurii.

Dacă cartela este * DATE, atunci se cheamă subprogramul DATA, care citește parametrii elementelor structurii și completează tabelele de parametri.

În sfîrșit, dacă cartela este * REZOLVA, atunci se cheamă subprogramul ACE, analizorul cartelelor pentru calculul tensiunilor și afișarea rezultatelor. Acest subprogram citește cartelele de afișare, care indică ce tensiuni se cer și cum trebuie afișate.

Determinarea parametrilor adimensionali, construirea matricei sistemului de ecuații al constantelor de integrare și calculul tensiunilor se execută de către subprograme specifice pentru fiecare tip de element.

În tabelul 5.2 sînt indicate subprogramele mai importante folosite de STAXIS. În afară de aceste subprograme, mai există și altele, mai puțin semnificative.

În paragrafele următoare se descriu amănunțit cîteva din subprogramele enumerate în tabelul 5.2.

Comunicația între diferitele subprograme se face în principal prin intermediul unei zone comune a memoriei, în care se află o serie de indicatori și tablouri. Această zonă are două porțiuni distincte și anume: o porțiune cu variabile în virgulă fixă și o porțiune cu variabile în virgulă mobilă.

În tabelul 5.3 este indicată structura zonei comune. Variabilele au fost trecute în ordinea în care apar ele în declarațiile de COMMON din program.

Pentru a ușura înțelegerea paragrafelor următoare este necesară o scurtă descriere a unora dintre variabilele aflate în zona comună.

1. ISP: indicatorul de stare a programului. Acest indicator poate avea cinci valori și indică una din cinci etape de prelucrare în care se poate afla un program scris în limbajul STAXIS. Aceste etape de prelucrare sînt inițiate de cîte o cartelă de control (cartelă de tip asterisc). De aceea, acest indicator este poziționat de ACC, după cum urmează:

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.2

Principalele subprograme ale programului STAXIS

Subprogram	Funcția îndeplinită
ACC	Analizorul cartelelor de control.
STRUC	Analizorul cartelelor de structură.
DATA	Analizorul cartelelor de date.
ACE	Analizorul cartelelor de execuție.
CIS	Subprogramul de element pentru cilindrul scurt.
CIL	Subprogramul de element pentru cilindrul lung.
PLI	Subprogramul de element pentru placa inelară.
PLA	Subprogramul de element pentru placa circulară.
CON1 CON2	Subprogramele de element pentru învelișul conic.
SFC	Subprogramul de element pentru calota sferică
SFE	Subprogramul de element pentru învelișul sferic.
M1	Subprogramul de împachetare.
ERROR	Subprogramul de tipărire al marcajului de eroare.
CONV	Subprogramul de conversie a numerelor în virgulă fixă.
FCONV	Subprogramul de conversie a numerelor în virgulă mobilă
JIK	Determină coloanele din matricea sistemului, în care se află coeficienții unui element.
SIST7	Subprogramul de rezolvare a sistemului de ecuații al constantelor de integrare.
DESEN	Subprogramul de tipărire a graficului tensiunilor.
IK	Determină liniile, din matricea sistemului, în care se află coeficienții unui element.

— ISP=1 : programul caută prima cartelă de tip*STRUCTURA. Aceasta este valoarea inițială a indicatorului ISP și este atribuită în etapa de inițializări a programului (v. fig. 5.1);

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.3

Structura zonei comune a memoriei

Variabile și tablouri în virgulă fixă	Variabile și tablouri în virgulă mobilă
ISP	PM(15,22)
IP	PA(15,22)
IERR	A(20,20)
KR	B(20)
KW	X(20)
ICC	TABS(20)
NCOL	VABS
NCR	VEF(4)
TIP	VEFM(4)
NEL	VABM(4)
NOJ	RS
ISTA	HS
L	
IR	
INDA	
NABS	
ITD	
IERR1	
M	
ITA	
B1(80)	
B2(80)	
IT(15)	
ISB(15)	
IC(30)	
MAG(30)	
IRA(30)	

Scanned with OKEN Scanner

— ISP = 2 : s-a citit o cartelă de tipul * STRUCTURA;
— ISP = 3 : s-a citit prima cartelă de tip * DATE, pentru o structură;
— ISP = 4 : s-a citit încă o cartelă de tip * DATE (cartelă care va introduce modificări);
— ISP = 5 : s-a citit o cartelă de tip * REZOLVA.

Indicatorul ISP este folosit şi pentru a verifica corectitudinea ordinii în care sînt dispuse cartelele de control şi de a permite programului să ştie care a fost ultima cartelă de control citită şi ce funcţie are ea.

2. IP : indicator al programului de analiză care urmează a fi executat, sau care se află în execuţie :
— IP = 1 : programul de introducere a structurii (STRUC);
— IP = 2 : programul de introducere a datelor (DATA);
— IP = 3 : programul principal, în faza de prelucrare a datelor.

Acest indicator este poziţionat de analizorul cartelelor de control, ACC.

3. ICC : indicator care arată că a fost citită o cartelă de comandă (cartelă*) de către alt program decît analizorul cartelelor de control (ACC) :
— ICC = 0 : nu a fost citită o cartelă;
— ICC = 1 : a fost citită o cartelă.

Acest indicator este poziţionat pe 1 de către orice program de analiză care întîlneşte o cartelă *. Cartela urmează să fie apoi analizată de ACC.

4. IERR : indicator şi numărător de erori. Indică dacă există erori şi cîte sînt. El este poziţionat pe 0 la citirea unei cartele * STRUCTURA şi este incrementat de orice program care întîlneşte o situaţie de eroare.

Dacă acest indicator este diferit de 0, atunci programul analizează în continuare cartelele utilizatorului, dar nu execută calculul constantelor de integrare şi al tensiunilor.

Există însă şi situaţii în care, deşi a apărut o eroare, se pot face calcule de tensiuni şi anume în cazul în care eroarea este localizată într-o cartelă de afişaj, care apare după o cartelă de tip * REZOLVA. Pentru acest tip de erori există un alt indicator şi anume IERR1.

5. ISTA : indicator de stare execuţie. Acest indicator arată etapa în care se află operaţia de calcul a tensiunilor şi de tipărire a rezultatelor. El este poziţionat de ACC şi de programul principal. Este folosit cu precădere de către subprogramele de elemente, care stabilesc cu ajutorul lui ce au de făcut atunci cînd sînt apelate de către programul principal :

Scanned with OKEN Scanner

— ISTA = 1 : se calculează parametrii adimensionali;
— ISTA =2 : se verifică parametrii adimensionali, se construieşte sistemul de ecuaţii şi se rezolvă;
— ISTA = 3 : se tipăreşte capul de tabel în vederea afişării tensiunilor;
— ISTA = 4 : se calculează şi se afişează tensiunile.

6. ITD : indicatorul tipului de date introduse cu prima cartelă * DATE :
— ITD = 1 : date metrice;
— ITD = 2 : date adimensionale;
— ITD = 3 : tipul datelor nu a fost specificat sau a fost specificat incorect. Aceasta este, desigur, o situaţie de eroare.

Acest indicator este poziţionat de ACC.

7. L : indicator care memorează numărul elementului prelucrat la momentul respectiv.

8. KR : variabilă în care se memorează numărul logic al perifericului de intrare, adică, numărul logic al cititorului de cartele. Pentru IBM 1130 acest număr este 2, iar pentru FELIX C—256 este 105.

9. KW : variabilă în care se memorează numărul logic al perifericului de ieşire, adică numărul logic al imprimantei. Pentru IBM 1130 acest număr este 5, iar pentru FELIX C—256 este 108.

Indicatorii descrişi, sînt indicatori cu semnificaţie generală, care sînt utilizaţi de majoritatea subprogramelor mai importante. Restul indicatorilor au utilizări speciale şi vor fi descrişi atunci sînd se vor descrie subprogramele care îi folosesc.

În cele ce urmează se descriu subprogramele care analizează şi coordonează execuţia programelor scrise în limbajul STAXIS, subprogramele de element şi programul principal.

Pentru a înţelege cum se face analiza sintactică a diferitelor cartele se prezintă, mai întîi, subprogramul de împachetare (M1).

5.2. Subprogramul de împachetare

Pentru a analiza din punct de vedere sintactic şi semantic conţinutul unei cartele, caracterele de pe cartela respectivă se grupează în şiruri care au o anumită semnificaţie, care se numesc pachete.

Un pachet, este deci un şir de caractere care formează din punct de vedere sintactic o entitate separată şi care are o anumită semnificaţie.

Prin urmare, conţinutul unei cartele poate fi privit ca o grupare de pachete de caractere, fiecare pachet avînd o anumită semnificaţie.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru un limbaj oarecare, numărul de tipuri de pachete este în general finit.

Pentru limbajul STAXIS opt tipuri de pachete sînt acoperitoare.

Orice program care analizează o instrucţiune, analizează de fapt conţinutul pachetelor de caractere care, asamblate, formează conţinutul cartelei respective. În acest fel procesul de analiză se simplifică foarte mult. Pachetele sînt recunoscute de un subprogram care este folosit de toate subprogramele de analiză. El citeşte o cartelă şi apoi o explorează furnizînd la cerere cîte un pachet de caractere. Această activitate este efectuată de subprogramul M1.

După cum s-a arătat, un pachet reprezintă un şir de caractere care luate împreună au o anumită semnificaţie în cadrul limbajului. Caracterele care formează pachetul trebuie să facă parte din alfabetul limbajului, adică din setul de caractere considerate valide în limbajul respectiv. Alfabetul limbajului STAXIS este format din următoarele tipuri de caractere:

— caractere alfabetice: litere, de la A la Z;

— caractere numerice: cifre, de la 0 la 9;

— spaţiul (blank-ul);

— semne: punct (.), plus (+), asterisc (*), minus (—), virgulă (,), egal (=).

Acestea sînt caracterele valide în limbajul STAXIS, celelalte sînt considerate eronate şi sînt semnalate ca atare, cînd apar.

Trebuie subliniat că în comentarii pot apare orice caractere, chiar şi cele care nu fac parte din alfabetul limbajului. Numai instrucţiunile STAXIS trebuie să fie alcătuite din caracterele alfabetului limbajului.

Cu alfabetul definit mai sus se construiesc următoarele tipuri de pachete:

1. Simbol: orice şir de caractere alfabetice (litere). Numărul de caractere din pachet este arbitrar, cu condiţia să nu depăşească 80, care este numărul maxim de caractere ce pot fi perforate pe o cartelă.

2. Număr: orice şir de caractere numerice (cifre). Ca şi în cazul simbolului, numărul de caractere este arbitrar, cu restricţia amintită.

3. Separator: unul sau mai multe blank-uri. Deci un grup de blank-uri formează un singur pachet.

4. Delimitator: este un pachet format dintr-un singur caracter, virgula (,). Dacă apar mai multe virgule, una după alta, ele formează pachete separate.

Scanned with OKEN Scanner

5. Terminator: este un pachet fictiv, care marchează sfîrșitul unei cartele. La primirea unui astfel de pachet, orice subprogram de analiză știe că s-a terminat cartela pe care o analiza în momentul respectiv. Acest pachet este necesar deoarece subprogramele de analiză nu numără cartelele pe care le parcurg. Această evidență este ținută de M1. Pachetul de tip terminator se notează cu semnul# (diez).

6. Eroare: este un pachet format dintr-un singur caracter, și anume un caracter care nu face parte din alfabetul limbajului.

7. Indicator cartelă de comandă: este un pachet format dintr-un singur caracter și anume caracterul asterisc (*).

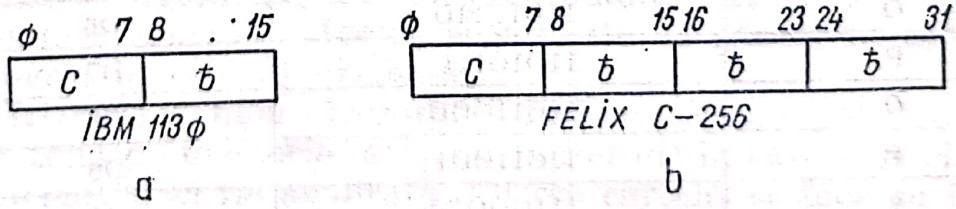
8. Semn algebric: este un pachet format dintr-un singur caracter și anume plus (+), minus (—), punct zecimal (.) sau egal (=).

Cu ajutorul acestor opt tipuri de pachete se poate construi orice instrucțiune a limbajului STAXIS. Ca atare, orice subprogram de analiză trebuie să recunoască aceste tipuri de pachete.

Este necesar să se facă cîteva precizări în legătură cu reprezentarea caracterelor alfanumerice în calculator.

Pentru a reprezenta caracterele alfanumerice se folosește codul EBCDIC. În conformitate cu acest cod, fiecărui caracter alfanumeric îi corespunde o combinație de opt cifre binare (biți), care formează un grup numit chiar caracter. Deoarece cu opt biți se pot codifica două cifre hexazecimale, înseamnă că în codul EBCDIC fiecărui caracter alfanumeric îi corespunde un grup de două cifre hexazecimale. În tabelul 5.4 se dau codurile EBCDIC corespunzătoare alfabetului STAXIS.

După cum se știe, în limbajul FORTRAN citirea caracterelor alfanumerice se face cu ajutorul formatului An. În cazul calculatorului IBM 1130, care are cuvinte cu lungimea de 16 biți, dacă se folosește formatul A1 la citirea valorii unei variabile întregi, atunci, după cum se vede în figura 5.2, a, caracterul citit se va depune în



a b

Fig. 5.2.

jumătatea din stînga a cuvîntului, iar în jumătatea din dreapta se va depune un blank. Calculatorul FELIX C—256 lucrează cu cuvinte de 32 de biți și așa cum se arată în figura 5.2, b, caracterul se

Tabelul 5.4

Codurile EBCDIC ale alfabetului STAXIS

Caracterul	Cod EBCDIC	
	Binar	Hexazecimal
1	2	3
b (blank)	Ø1ØØØØØØ	4Ø
.	Ø1ØØ1Ø11	4B
+	Ø1ØØ111Ø	4E
*	Ø1Ø111ØØ	5C
—	Ø11ØØØØØ	6Ø
,	Ø11Ø1Ø11	6B
=	Ø1111111Ø	7E
A	11ØØØØØ1	C1
B	11ØØØ1Ø	C2
C	11ØØØ11	C3
D	11ØØØ1ØØ	C4
E	11ØØØ1Ø1	C5
F	11ØØØ11Ø	C6
G	11ØØØ111	C7
H	11ØØ1ØØØ	C8
I	11ØØ1ØØ1	C9
J	11Ø1ØØØ1	D1
K	11Ø1ØØ1Ø	D2
L	11Ø1ØØ11	D3
M	11Ø1Ø1ØØ	D4
N	11Ø1Ø1Ø1	D5
O	11Ø1Ø11Ø	D6
P	11Ø1Ø111	D7
Q	11Ø11ØØØ	D8
R	11Ø11ØØ1	D9
S	111ØØØ1Ø	E2
T	111ØØ011	E3
U	111ØØ1ØØ	E4
V	111ØØ1Ø1	E5
W	111ØØ11Ø	E6

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.4. (continuare)

1	2	3
X	111ØØ111	E7
Y	111Ø1ØØØ	E8
Z	111Ø1ØØ1	E9
Ø	1111ØØØØ	FØ
1	1111ØØØ1	F1
2	1111ØØ1Ø	F2
3	1111ØØ11	F3
4	1111Ø1ØØ	F4
5	1111Ø1Ø1	F5
6	1111Ø11Ø	F6
7	1111Ø111	F7
8	11111ØØØ	F8
9	11111ØØ1	F9

va depune în primul octet din stînga, ceilalţi 3 octeţi fiind completaţi cu blank-uri.

Subprogramul M1 este chemat de orice subprogram de analiză cu ajutorul unei instrucţiuni de forma

CALL M1(IND)

unde IND este un indicator cu următoarea semnificaţie:

— IND = 0: subprogramul M1 citeşte o cartelă şi asamblează primul pachet de pe acea cartelă;

— IND = 1: subprogramul M1 asamblează un pachet de pe o cartelă citită anterior.

Celelalte argumente ale subprogramului M1 se transferă prin zona comună generală. Aceste argumente se găsesc în tabelul 5.3 şi se descriu în cele ce urmează:

— B1(80): tablou în virgulă fixă, cu 80 de elemente. El reprezintă zona de memorie tampon (buffer-ul) în care este citită cartela ce urmează să fie analizată. Citirea cartelei se face cu formatul 80A1, astfel că primu octet al elementului n din tablou ($n = 1, \ldots, 80$) va conţine caracterul din coloana n a cartelei respective.

— NCOL: indicator în care se memorează numărul următoarei coloane ce urmează să fie explorată de către M1. Evident, valoarea acestui indicator este cuprinsă între 1 şi 80, deoarece cartela are 80 de coloane. În momentul în care valoarea lui devine 81, înseamnă că

Scanned with OKEN Scanner

întreaga cartelă a fost explorată și M1 trimite subprogramului chemător un pachet de tip terminator.

— B2(80) : tablou, în virgulă fixă, de 80 de elemente, care reprezintă zona de memorie în care este asamblat pachetul de caractere ce urmează a fi trimis subprogramului chemător. Caracterele care vor forma pachetul sînt extrase din buffer-ul B1.

— NCR : indicator în care M1 introduce numărul de caractere conținute în pachetul respectiv. Acest număr poate fi cuprins între 1 și 80. Pentru tipurile de pachete care, prin definiție, nu au decît un singur caracter, acest indicator nu are semnificație. Deci el este utilizat numai pentru tipurile simbol și număr.

— TIP : indicator în care M1 depune codul tipului pachetului respectiv. Valoarea lui este cuprinsă între 1 și 8, funcție de tipul pachetului, în conformitate cu ordinea în care au fost ele descrise mai sus. De exemplu, dacă pachetul este de tip simbol, atunci TIP = 1, dacă este de tip număr atunci TIP = 2 etc.

În figura 5.3, a și b este reprezentată organigrama de principiu a subprogramului M1.

La intrarea în subprogram se testează valoarea indicatorului IND. Dacă aceasta este Ø atunci se va citi o cartelă în buffer-ul B1 și se va poziționa indicatorul de coloană NCOL pe 1, adică se începe explorarea unei cartele noi. Mai departe subprogramul începe construirea unui pachet de caractere. În acest scop el determină tipul caracterelor de pe cartela analizată. Se presupune, de exemplu, că primul caracter întîlnit este o literă. În acest caz înseamnă că pachetul va fi de tip simbol, deci indicatorului TIP i se va atribui valoarea 1 și va începe asamblarea pachetului în buffer-ul B2. Operația se termină în unul din următoarele cazuri :

— cartela s-a epuizat (NCOL > 80);

— următorul caracter care trebuie introdus în pachet nu este literă.

În acest moment pachetul este gata pentru a fi livrat subprogramului chemător.

Un proces asemănător are loc în cazul construirii unui pachet de tip număr, cu deosebirea că în acest caz indicatorul TIP va lua valoarea 2.

În ambele cazuri, în indicatorul NCR se depozitează numărul de caractere din pachetul construit.

Dacă caracterul întîlnit este blank (spațiu) atunci se va explora cartela pînă cînd se întîlnește primul caracter diferit de blank. În acest fel se sare peste blank-urile care separă două cîmpuri de pe cartelă. Numărul acestor blank-uri nu interesează, de aceea contorul NCR nu este actualizat. Nu se completează nici buffer-ul B2, deoarece

Scanned with OKEN Scanner

pentru programul chemător este suficientă informaţia furnizată de indicatorul TIP. Acest lucru este valabil şi pentru pachetele de tip 4, 6 şi 7. Nici la ele contorul NCR nu are semnificaţie, deoarece, prin

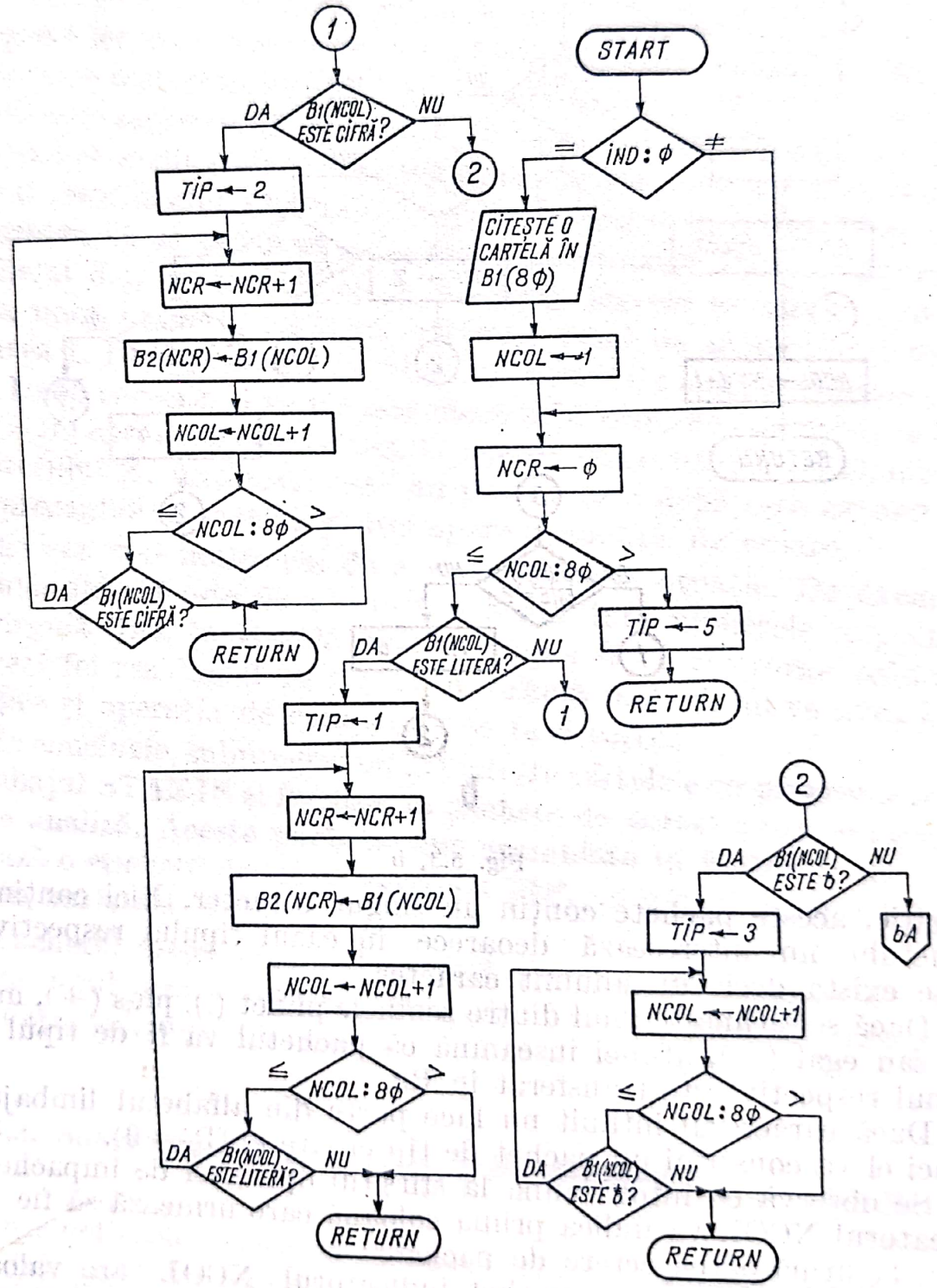


Fig. 5.3, a

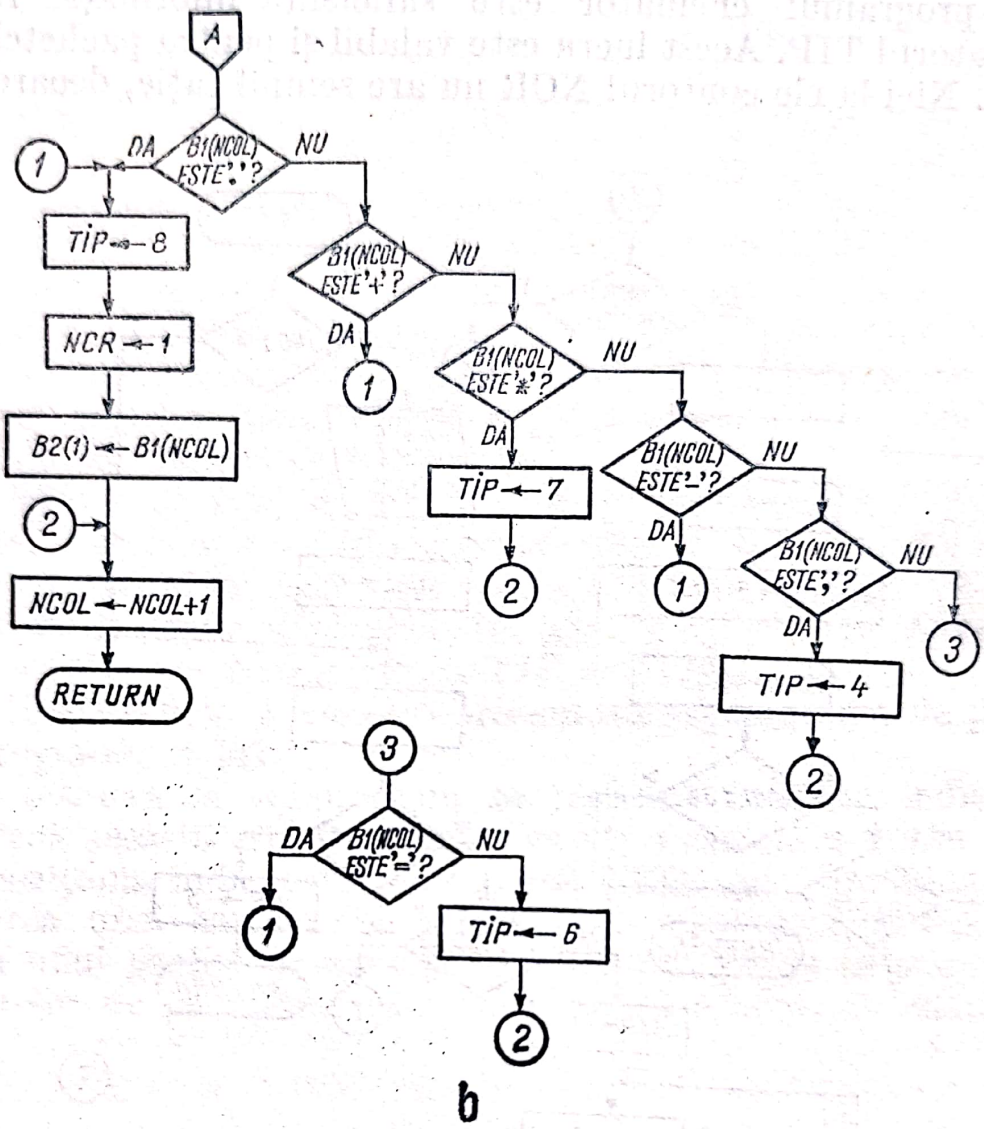


Fig. 5.3, b

definiţie, aceste pachete conţin un singur caracter. Nici conţinutul pachetului nu interesează deoarece în cazul tipului respectiv nu poate exista decît un anumit caracter.

Dacă se întîlneşte unul dintre semnele punct (.), plus (+), minus (—) sau egal (=), atunci înseamnă că pachetul va fi de tipul 8 şi semnul respectiv este transferat în B2.

Dacă caracterul întîlnit nu face parte din alfabetul limbajului, atunci el va constitui un pachet de tip eroare (TIP = 9).

Se observă că întotdeauna la sfîrşitul operaţiei de împachetare indicatorul NCOL va indica prima coloană care urmează să fie analizată la următoarea cerere de pachet.

Dacă la cererea unui pachet indicatorul NCOL are valoarea 81 înseamnă că toată cartela a fost explorată anterior acestei cereri şi M1 trimite un pachet de tip 5.

Scanned with OKEN Scanner

Sînt necesare cîteva precizări în legătură cu recunoașterea caracterelor. Acest lucru se face prin comparație. Pentru aceasta, în FORTRAN cel mai comod ar fi să se folosească instrucțiunea IF logic. Dar după cum s-a arătat, pentru ca programul să poată fi executat pe o gamă largă de calculatoare, s-a folosit limbajul BASIC FORTRAN IV, în care instrucțiunea IF logic nu este implementată. De aceea s-a folosit instrucțiunea IF aritmetic, în care, din codul caracterului necunoscut se scade codul caracterului cu care se compară și se testează semnul rezultatului. Operația de scădere trebuie însă tratată cu atenție, pentru că ar putea duce la rezultate eronate. Privind figura 5.2 și tabelul 5.4, constatăm că în memorie literele și cifrele apar sub forma unor numere negative, deoarece bitul de semn (bitul 0) are valoarea 1. În plus, aceste numere sînt destul de mari în valoare absolută. Dacă caracterul ce trebuie identificat este, de exemplu, semnul egal (=) al cărui cod este un număr pozitiv mare, atunci, scăzînd codul caracterului A, rezultatul este un număr care depășește capacitatea de reprezentare a mașinii și deci apare o condiție de eroare.

Există mai multe căi de a evita această situație. De exemplu, o soluție simplă este de a transforma mai întîi numerele respective, din virgulă fixă, în virgulă mobilă și apoi să se efectueze scăderea. În acest fel rezultatul va fi și el în virgulă mobilă, nu va avea loc o depășire și operația de comparare se face corect.

În concluzie, subprogramul M1 citește cartelele cu programe scrise în limbajul STAXIS și furnizează pachete de caractere subprogramelor de analiză. Aceste pachete sînt asamblate în buffer-ul B2, li se atașează o etichetă de tip în variabila TIP, iar lungimea lor este indicată în variabila NCR.

Pachetul astfel asamblat și etichetat este gata pentru a fi preluat de unul dintre subprogramele de analiză, care va interpreta informația transmisă de acesta, în funcție de context.

5.3. Subprogramul de analiză a instrucțiunilor de comandă

Instrucțiunile (cartelele de comandă) sînt cele care încep cu asterisc (*). Rolul lor este de a indica programului că urmează un set de cartele care conțin informații în legătură cu structura, cu parametrii sau cu modul de afișare a rezultatelor.

Scanned with OKEN Scanner

În ordinea în care apar ele în mod normal într-un program STAXIS, cartelele de comandă sînt următoarele :

* STRUCTURA

* DATE $\left\{\begin{matrix}\text{METRIC}\\\text{ADIM}\end{matrix}\right\}$

* REZOLVA

* STOP

Rolul acestor comenzi a fost descris în capitolul 4 şi nu se va mai insista aici asupra acestui lucru, ci doar se va arăta cum se analizează aceste cartele şi cum este interpretată informaţia transmisă de ele.

În figura 5.4 este indicată configuraţia sintactică a unei cartele de comandă. Observăm că în cazul cel mai general (cazul cartelei * DATE) ea conţine cinci cîmpuri obligatorii, numerotate de la 1 la 5. Comentariile nu sînt luate în considerare de către programul care face analiza.

Configuraţia din figura 5.4 corespunde comenzii * DATE. Pentru celelalte comenzi sînt suficiente doar primele trei cîmpuri.

Evidenţa cîmpurilor este ţinută cu ajutorul unui contor de cîmpuri CC1. Acesta este o variabilă în virgulă fixă, a cărei valoare la un moment dat este egală cu numărul de ordine al cîmpului analizat în momentul respectiv.

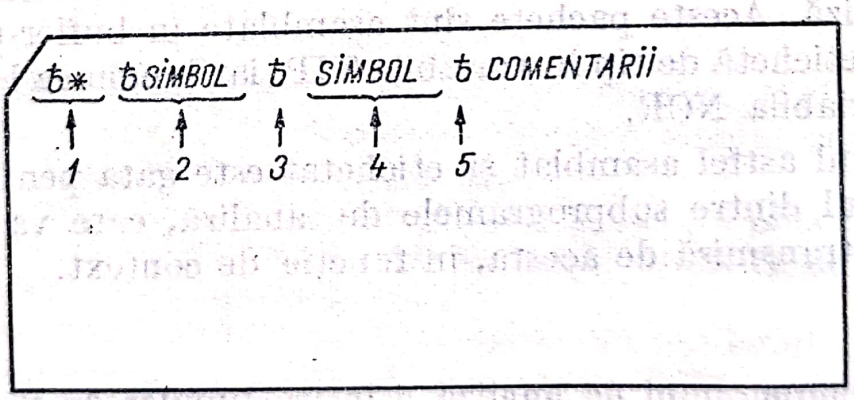


Fig. 5.4

Blank-urile din cîmpurile 1 şi 2 sînt facultative şi deci nu sînt luate în considerare.

Blank-urile din cîmpurile 3 şi 5 sînt obligatorii, ele avînd rol de separator între două zone, care transmit informaţii diferite.

Scanned with OKEN Scanner

Subprogramul care analizează cartelele de comandă este ACC. Rolul lui este de a interpreta informaţia transmisă de aceste cartele şi de a poziţiona următorii indicatori (v. § 5.1) :

— ISP : indicatorul de stare a programului ;

— IP : indicatorul programului de analiză care urmează a fi chemat ;

— ITD : indicatorul tipului de parametri introduşi cu prima comandă * DATE ;

— ISTA : indicatorul de stare a execuţiei.

Toate argumentele acestui subprogram se află în zona comună şi deci el va fi apelat cu o instrucţiune de forma

CALL ACC

În figurile 5.5, a — d, este reprezentată organigrama simplificată a subprogramului ACC.

Analiza unei cartele de comandă comportă două faze. În primul rînd se analizează corectitudinea ei din punct de vedere sintactic. Această etapă este ilustrată în figurile 5.5, a — c. În cea de a doua fază se analizează poziţia cartelei în contextul programului (fig. 5.5 ,d).

După cum s-a mai arătat, orice program de analiză poate să întîlnească o cartelă de comandă, adică o cartelă care începe cu un asterisc. În această situaţie subprogramul respectiv îşi încheie activitatea şi poziţionează pe 1 indicatorul ICC. Programul principal apelează apoi subprogramul ACC. Pe de altă parte, există anumite situaţii în care subprogramul ACC este apelat pentru a căuta o cartelă de comandă.

De aceea, subprogramul ACC îşi începe activitatea prin a verifica dacă cartela de comandă a fost citită de alt subprogram (ICC=1). Dacă da, contorului de cîmpuri i se atribuie valoarea 2. Dacă nu, ACC apelează subprogramul M1 cerîndu-i să citească o cartelă şi să-i furnizeze primul pachet de pe acea cartelă, iar contorul de cîmpuri ia valoarea 1.

Pe măsură ce se parcurge fiecare cîmp al cartelei, contorul de cîmpuri CC1 este incrementat cu o unitate. În momentul în care se analizează un cîmp, se iau în considerare toate tipurile de pachete care există în limbajul STAXIS. Dintre acestea însă numai unele pot apare în cîmpul respectiv.

De exemplu, în cîmpul 1 trebuie să apară un asterisc, sau un asterisc precedat de blank-uri. Dacă primul pachet este de tip blank, atunci se cere următorul pachet, care ar putea să fie un asterisc. Apariţia oricărui alt tip de pachet conduce la citirea unei cartele noi.

Scanned with OKEN Scanner

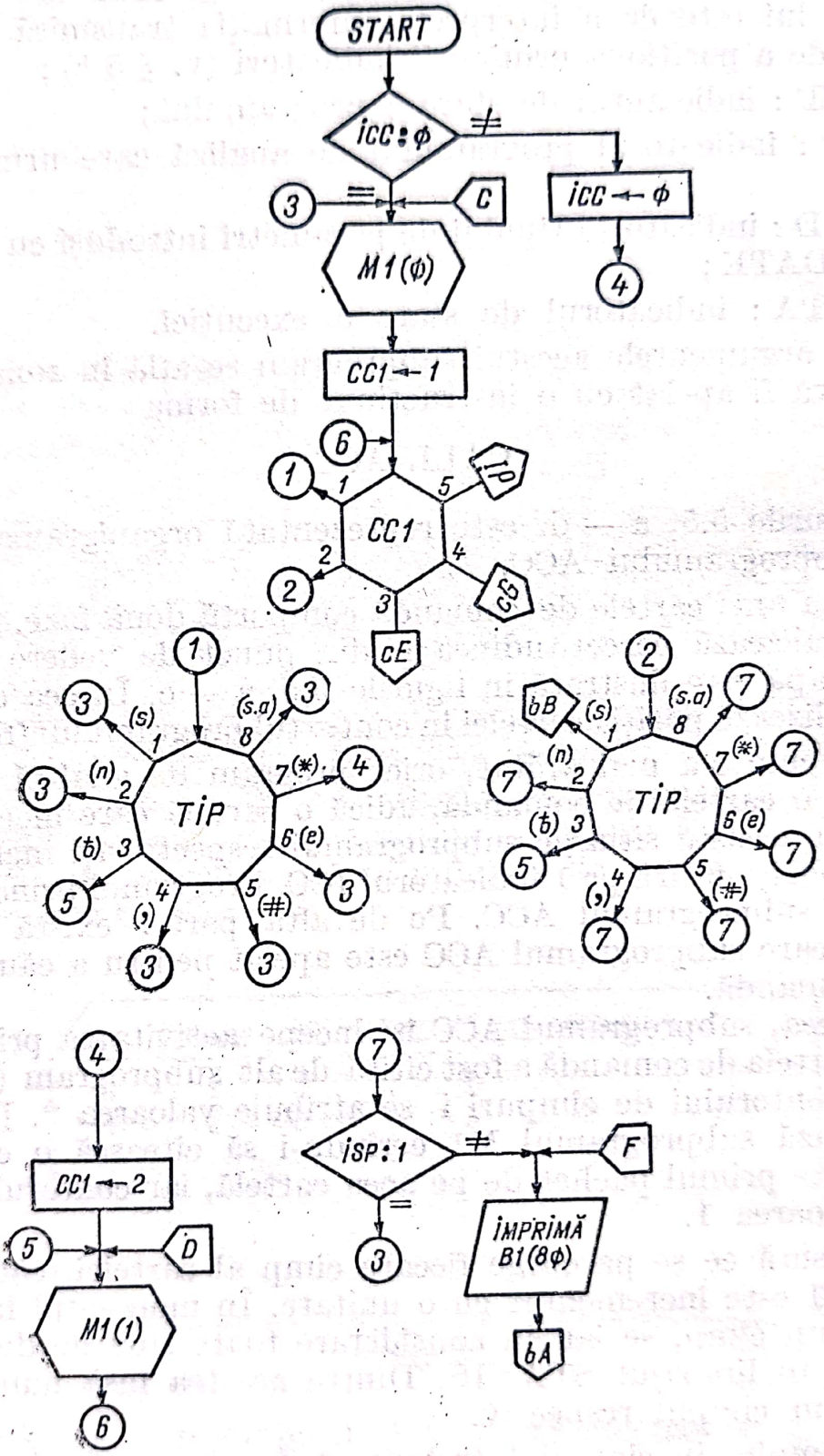
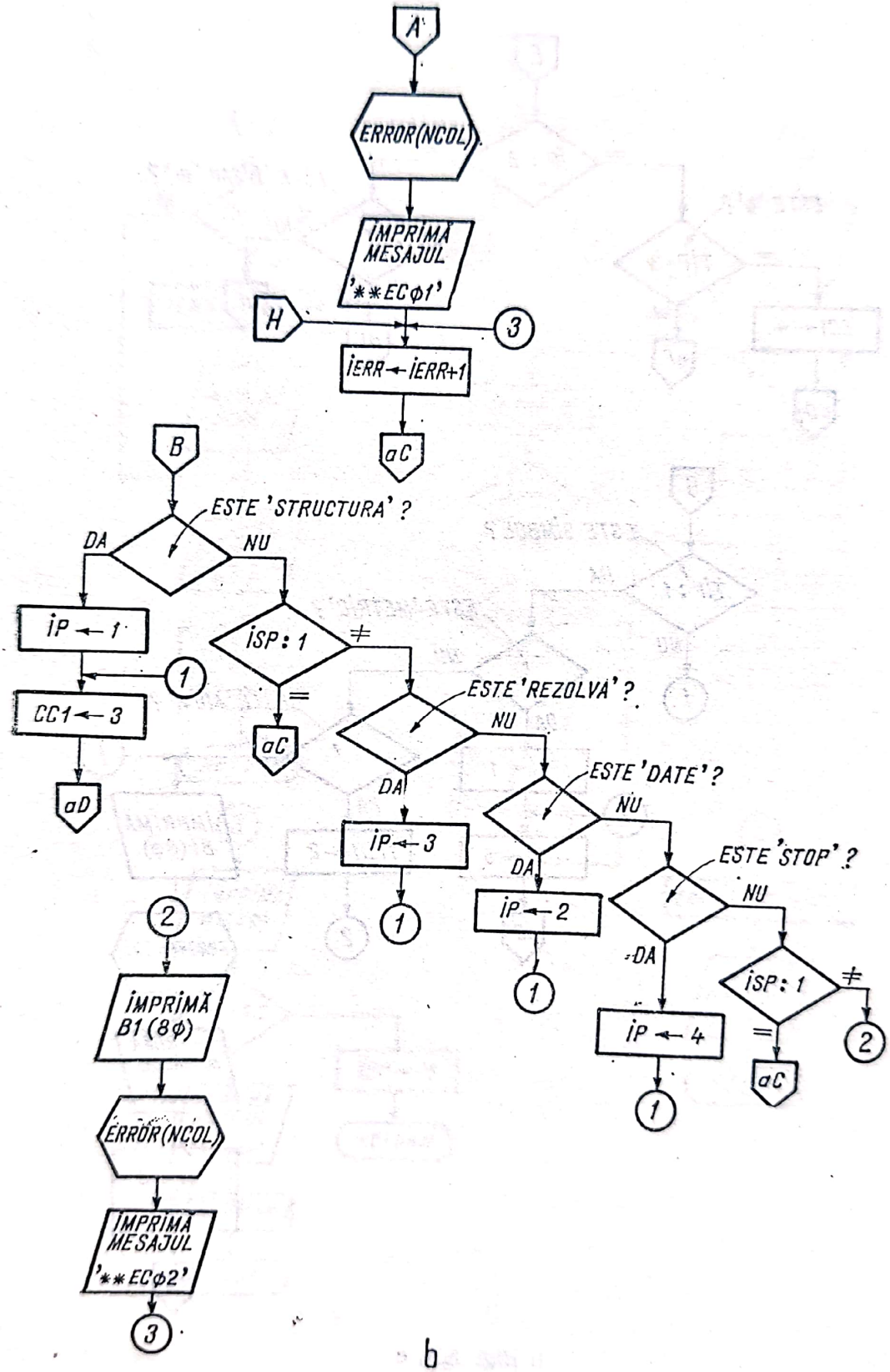

START
iCC:ϕ
≠
=
C
iCC←ϕ
M1(ϕ)
CC1←1
CC1
iP
cB
cE
TIP
(s)
(s.a)
(n)
(ţ)
(*)
(e)
(#)
bB
CC1←2
D
M1(1)
iSP:1
F
IMPRIMĂ B1(8ϕ)
bA

Fig. 5.5, a



b

Fig. 5.5, b

Scanned with OKEN Scanner

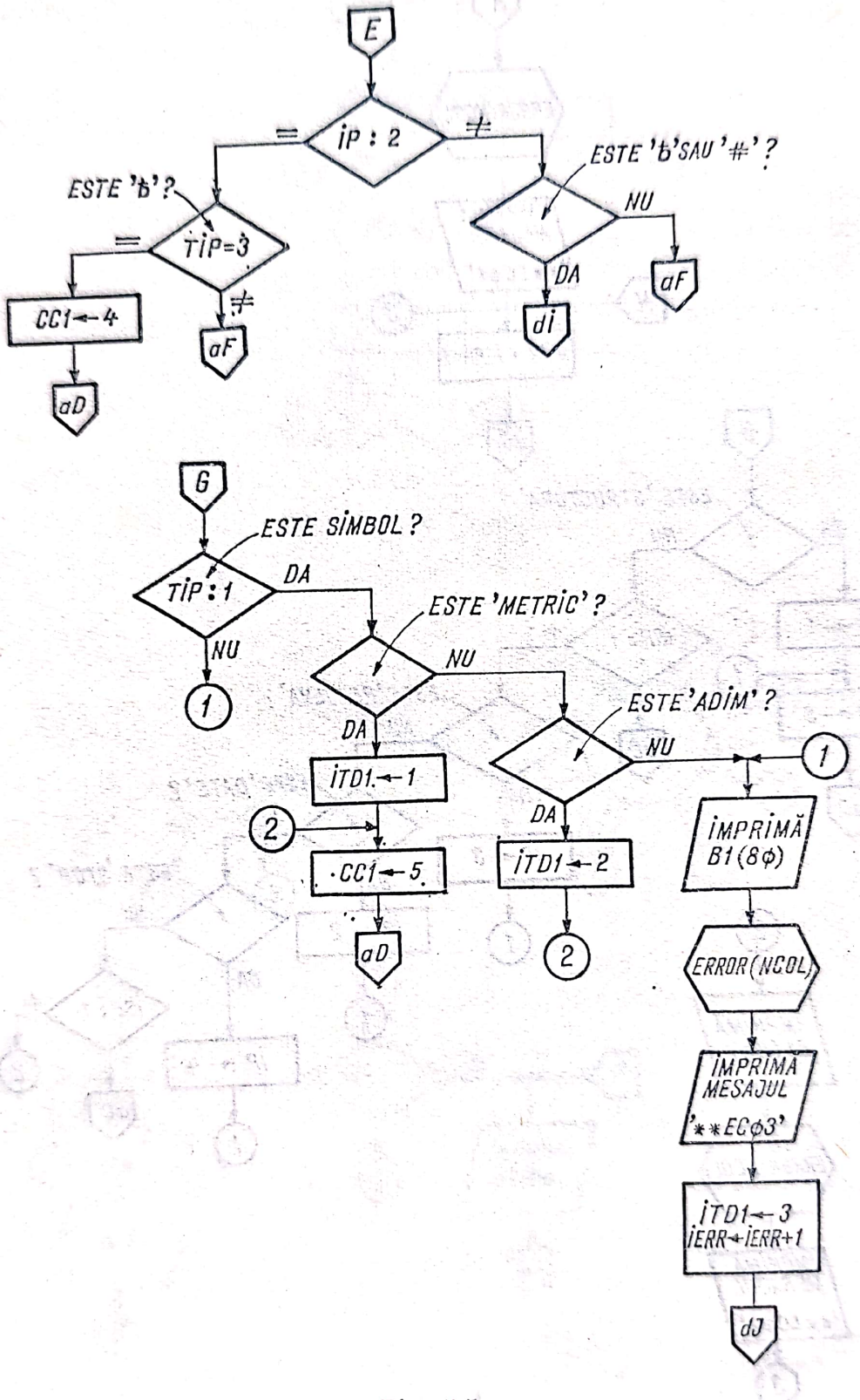
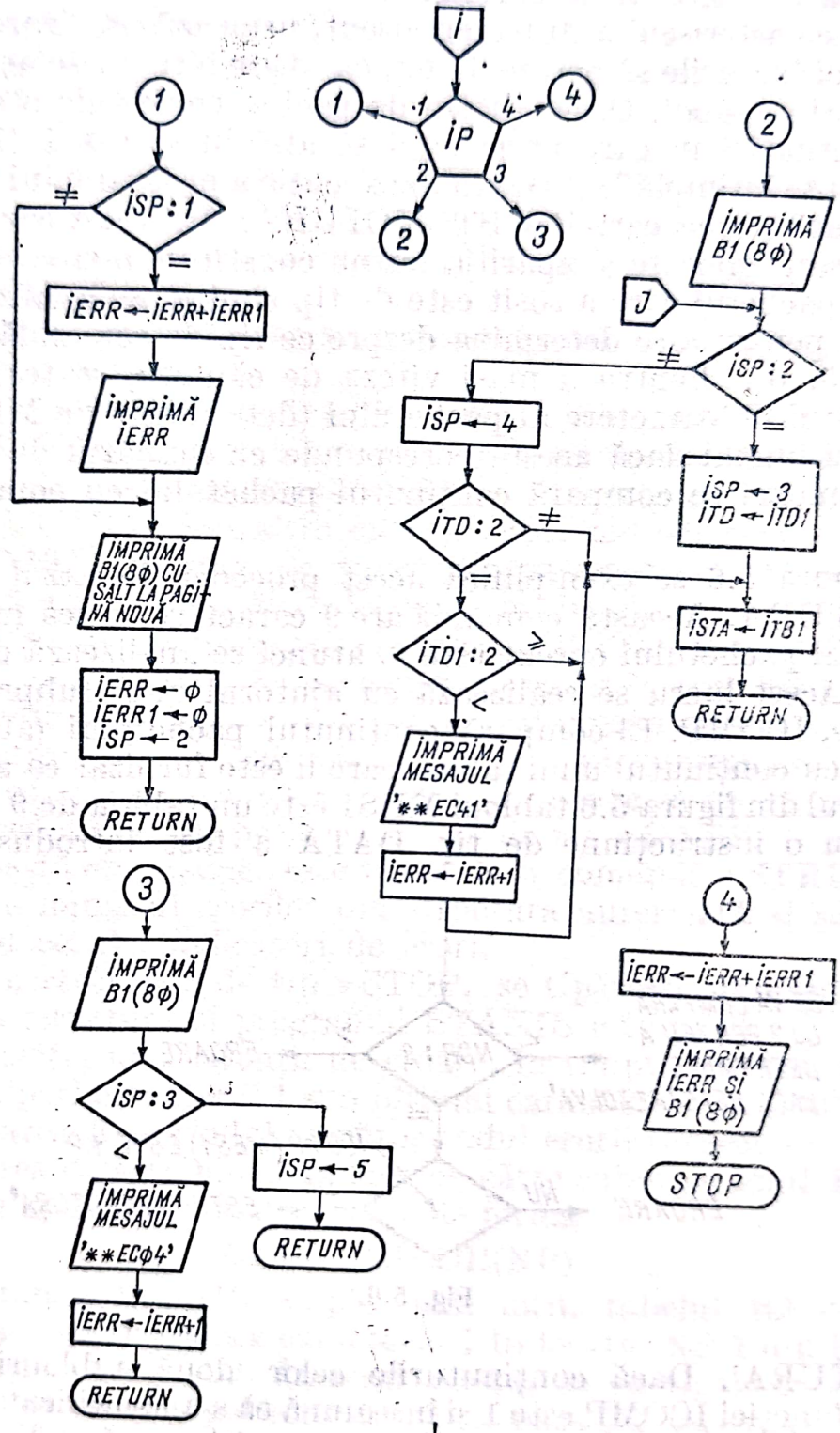

E
IP : 2
=
≠
ESTE 'b'?
TIP=3
=
≠
CC1←4
aD
aF
ESTE 'b'SAU '#'?
NU
DA
aF
dI
G
ESTE SIMBOL?
TIP : 1
DA
NU
1
ESTE 'METRIC'?
NU
DA
ITD1←1
2
CC1←5
aD
ESTE 'ADIM'?
NU
DA
ITD1←2
2
1
IMPRIMĂ B1(8φ)
ERROR(NCOL)
IMPRIMĂ MESAJUL '**EC03'
ITD1←3
IERR←IERR+1
dJ

Fig. 5.5, c


I
IP
1
2
3
4
ISP : 1
IERR ← IERR + IERR1
IMPRIMĂ IERR
IMPRIMĂ B1(8φ) CU SALT LA PAGINĂ NOUĂ
IERR ← φ
IERR1 ← φ
ISP ← 2
RETURN
IMPRIMĂ B1(8φ)
ISP : 3
ISP ← 5
RETURN
IMPRIMĂ MESAJUL '**EC φ4'
IERR ← IERR+1
RETURN
IMPRIMĂ B1(8φ)
J
ISP : 2
ISP ← 4
ITD : 2
ITD1 : 2
IMPRIMĂ MESAJUL '**EC41'
IERR ← IERR+1
ISP ← 3
ITD ← ITD1
ISTA ← ITB1
RETURN
IERR ← IERR + IERR1
IMPRIMĂ IERR ȘI B1(8φ)
STOP

d

Fig. 5.5, d

În acest fel, subprogramul ACC caută prima cartelă de comandă care se află în cititorul de cartele.

După ce asteriscul a fost recunoscut, urmează analizarea cîmpului 2. Şi aici lucrurile se petrec la fel, cu deosebire că se aşteaptă un pachet de tip simbol. Orice alt tip de pachet constituie o eroare, cu excepţia situaţiei în care programul se află în starea 1 (ISP = 1). Acest lucru se întîmplă la intrarea în execuţie a programului STAXIS, cînd se caută prima cartelă * STRUCTURA. În acest caz, cartelele de alt tip sînt ignorate şi apariţia lor nu constituie o eroare.

Dacă pachetul care a sosit este de tip simbol, se analizează conţinutul lui pentru a se determina despre ce tip de comandă este vorba (fig. 5.5, b). Pentru a mări viteza de căutare, se testează mai întîi numărul de caractere al pachetului (determinat de M1 şi depus în NCR) şi numai dacă acesta corespunde cu numărul de caractere al unei comenzi se compară conţinutul pachetului cu comanda respectivă.

În figura 5.6 se exemplifică acest procedeu în cazul comenzii * STRUCTURA. Această comandă are 9 caractere. Dacă numărul de caractere al pachetului curent este 9, atunci se analizează conţinutul acestuia. Acest lucru se realizează cu ajutorul unui subprogram de tip funcţie, ICOMP. El compară conţinutul pachetului (aflat în tabloul B2) cu conţinutul unui tablou care îi este furnizat ca argument. În exemplul din figura 5.6 tabloul MES1 este un tablou de 9 elemente, în care, cu o instrucţiune de tip DATA a fost introdus mesajul

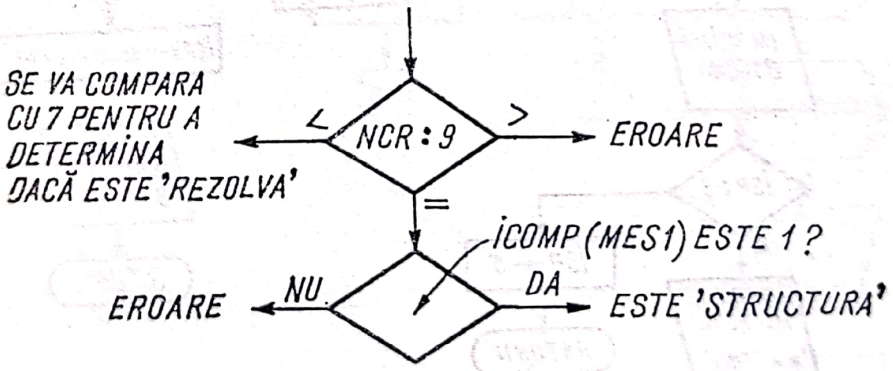


Fig. 5.6.

'STRUCTURA'. Dacă conţinuturile celor două tablouri coincid, valoarea funcţiei ICOMP este 1 şi înseamnă că s-a identificat comanda.

La recunoaşterea unei comenzi se poziţionează indicatorul IP pe o valoare corespunzătoare comenzii respective şi se incrementează contorul CC1. Orice comandă trebuie urmată de cel puţin un blank şi deci în cîmpul 3 se verifică acest lucru.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru comenzile *STRUCTURA, *REZOLVA şi *STOP analiza se termină aici. În cazul comenzii *DATE, urmează să se exploreze şi cîmpurile 4 şi 5 (fig. 5.5, c) pentru a se determina dacă tipul datelor este metric sau adimensional, în funcţie de care se poziţionează un indicator provizoriu, ITD1. Acest indicator ia aceleaşi valori ca şi ITD (v. § 5.1). În cazul în care tipul datelor nu a fost specificat sau a fost specificat incorect, lui ITD1 i se atribuie valoarea 3 şi cu aceasta etapa de analiză sintactică a cartelei de comandă a luat sfîrşit. Urmează etapa de analiză a poziţiei ei în contextul programului (fig. 5.5, d).

Obiectivul acestei etape este verificarea ordinii comenzilor în program şi anume :

— O cartelă de tip *DATE trebuie să urmeze unei cartele de tip *STRUCTURA. Acest lucru se întîmplă în mod automat, deoarece la iniţializarea programului (ISP = 1) acesta caută prima cartelă *STRUCTURA. În cadrul unei structuri însă pot exista mai multe cartele *DATE, urmate de valori ale parametrilor. Prima cartelă iniţializează parametrii, iar celelalte îi modifică.

Tot acum se poziţionează şi indicatorul ITD, funcţie de indicatorul provizoriu ITD1. De asemenea, în cazul în care este vorba de modificări ale parametrilor, iar parametrii iniţiali au fost adimensionali, se verifică dacă modificările sînt tot adimensionale.

— O cartelă de tip *REZOLVA nu poate să apară decît dacă a fost precedată de cel puţin o cartelă de tip *DATE.

În această etapă, dacă este vorba de o comandă *STRUCTURA se tipăreşte numărul erorilor din structura anterioară şi se poziţionează pe 0 cei doi indicatori de erori.

Dacă cartela este de tip *STOP, se tipăreşte numărul erorilor din ultima structură şi programul STAXIS este oprit.

La apariţia unei situaţii de eroare, în timpul analizei unei cartele se va tipări caracterul I sub ultimul caracter al pachetului care a produs eroarea şi pe rîndul următor codul erorii respective.

Tipărirea caracterului I se face de către subprogramul ERROR. Acesta este apelat cu o instrucţiune de forma

CALL ERROR(NP)

Subprogramul ERROR umple, mai întîi, tabelul B2 cu 80 de blank-uri şi apoi introduce caracterul I în locaţia NP-1 din B2, după care tipăreşte tabelul B2. În felul acesta, se va tipări caracterul I sub ultimul caracter al pachetului eronat dacă NP este egal cu NCOL (variabila NCOL indică întotdeauna primul caracter al următorului pachet din cartela analizată).

Acest subprogram este folosit de toate subprogramele care analizează cartele în programul STAXIS.

Scanned with OKEN Scanner

Subprogramul ACC joacă un rol foarte important în cadrul programului STAXIS, deoarece el recunoaște cele trei etape care apar în analiza unei structuri. El informează programul principal asupra activității care trebuie executată și ce subprogram va executa această activitate.

5.4. Subprogramul de analiză a descrierii structurii

Acesta este de fapt subprogramul procesor al comenzii *STRUCTURA.

După ce se întîlnește comanda *STRUCTURA, trebuie să urmeze descrierea structurii analizate. Mai întîi se specifică elementele care formează structura iar apoi se indică modul în care sînt legate aceste elemente pe contururi de asamblare (v. cap. 4).

Subprogramul care prelucrează aceste informații este STRUC. Pe baza lor, el atribuie valori unor variabile și completează anumite tablouri aflate în zona comună.

Aceste variabile și tablouri sînt :

1. NEL : variabilă întreagă, în care se memorează numărul de elemente ale structurii.

2. NOJ : variabilă întreagă, în care se memorează numărul de contururi de asamblare.

3. IT(15) : tablou în virgulă fixă, în care se trece codul tipului fiecărui element. De exemplu, tipul elementului 7 se află în locația 7 a tabloului IT. Inițial, acest tablou este completat cu Ø. Pe măsură ce se citesc elementele, se completează locația fiecărui element. Deci, dacă la sfîrșitul operației o anumită locație are valoarea Ø, înseamnă că în structura analizată nu există un element al cărui număr să coincidă cu numărul de ordine al locației respective. Tabloul IT are 15 elemente deoarece numărul maxim de elemente dintr-o structură s-a presupus 15.

4. ISB (15) : tablou în virgulă fixă, în care se memorează subtipul fiecărui element. Acest tablou se completează la fel ca și tabloul IT.

5. IC (30) : tablou în virgulă fixă, în care se menționează conturul (sau cele două contururi) la care se asamblează fiecare element. El are 30 de locații deoarece unele elemente pot fi asamblate la ambele capete și deci participă la două contururi. Prin convenție, locațiile impare ale tabloului IC indică contururile la care elementele se leagă cu marginea stîngă (marginea I). Indexul acestor locații va fi dat de relația 2L—1, unde L este numărul elementului. Locațiile pare ale tabloului IC indică contururile la care elementele se leagă cu marginea

Scanned with OKEN Scanner

dreaptă (marginea E). Indexul acestor locații va fi dat de relația 2L. De exemplu, elementul 7 se leagă cu marginea stîngă la conturul indicat în locația 13, iar cu marginea dreaptă la conturul indicat în locația 14.

6. MAG (30) : tablou în virgulă fixă, în care se memorează numărul de elemente care sînt asamblate pe conturul la care este asamblat un element dat. Toate cele arătate în legătură cu tabloul IC rămîn valabile și în cazul acestui tablou.

7. IRA (30) : tablou în virgulă fixă, în care se memorează rangul elementului pe un contur de asamblare. Prin rang, se înțelege numărul de ordine al elementului pe cartela care descrie legătura respectivă. De exemplu, să presupunem că se descrie conturul 1 al unei structuri, cu următoarea instrucțiune :

1 4E, 3, 5I

Elementul 5 are în acest contur (la care este asamblat cu marginea din stînga) rangul 3.

8. PM (15, 22) : tablou în virgulă mobilă, în care se memorează parametrii metrici ai fiecărui element. Acest tablou nu este completat de subprogramul STRUC ci este doar inițializat cu Ø.

9. PA (15, 22) : tablou în virgulă mobilă, în care se memorează parametrii adimensionali ai elementelor. Și acest tablou este doar inițializat cu Ø de subprogramul STRUC.

În figura 5.7, a și b este reprezentată organigrama de principiu a subprogramului STRUC, din care se observă că subprogramul începe cu inițializarea variabilelor și tablourilor menționate anterior. Apoi trece prin trei stări (faze) succesive. Evidența acestor stări este ținută de variabila întreagă CS (contor de stări).

În prima fază (CS = 1), subprogramul trebuie să întîlnească cartela ELEMENTE care precede descrierea elementelor componente ale structurii.

Analiza acestei cartele se face folosind și aici un contor de cîmpuri (CC). Structura acestei cartele și valorile contorului de cîmpuri sînt indicate în figura 5.8.

Dacă se întîlnește cartela ELEMENTE și este corectă, atunci contorul de stări este avansat cu o unitate și se trece în starea următoare. În cazul în care cartela este incorectă, se emite mesajul **EC Ø5 și subprogramul se oprește.

Se poate întîmpla ca utilizatorul să uite să introducă cartelele de descriere a structurii și subprogramul să întîlnească o cartelă de comandă (de exemplu * DATE) care se recunoaște după existența unui asterisc (*) în cîmpul 1 al cartelei. În acest caz, subprogramul

Scanned with OKEN Scanner

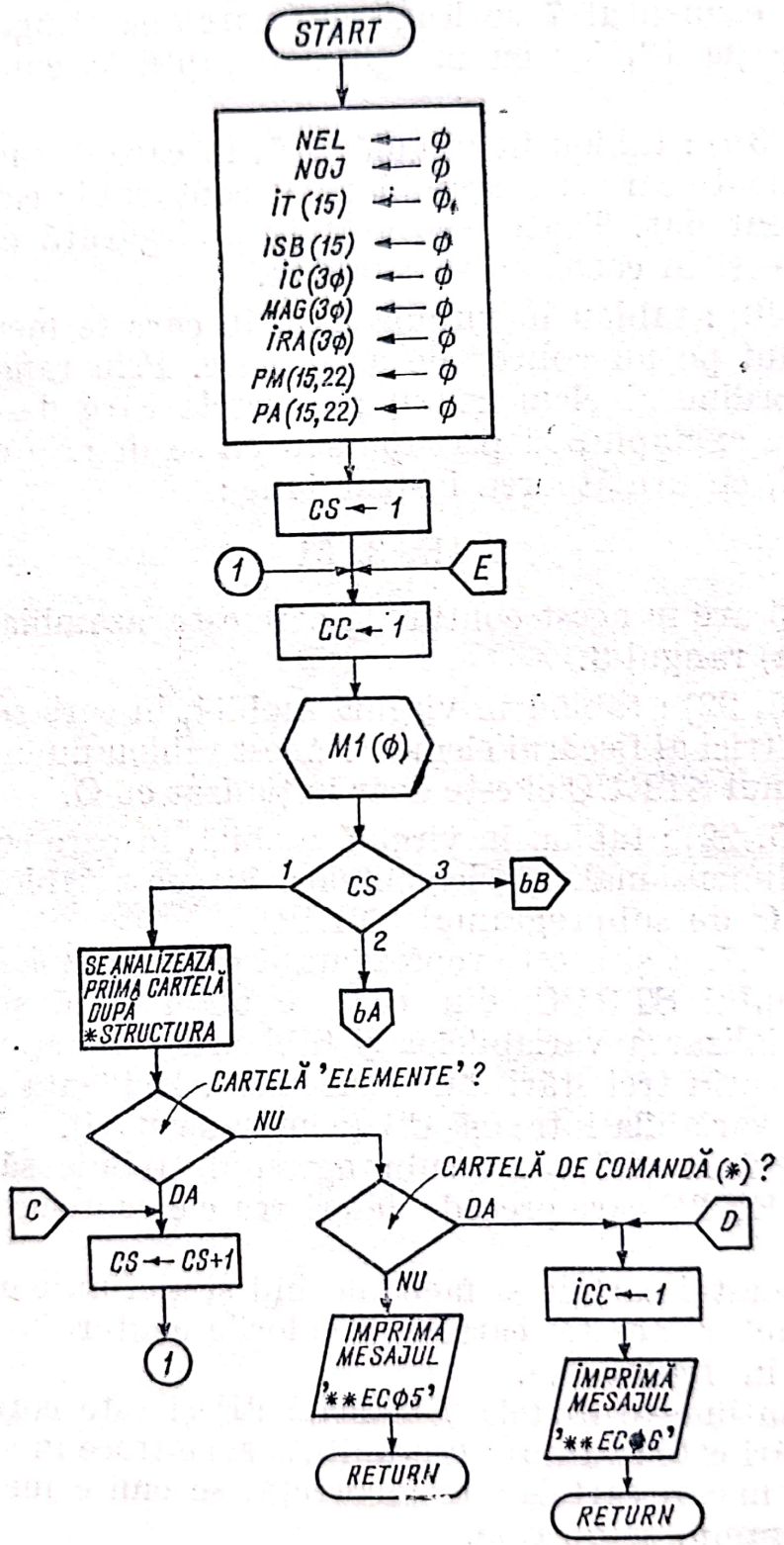
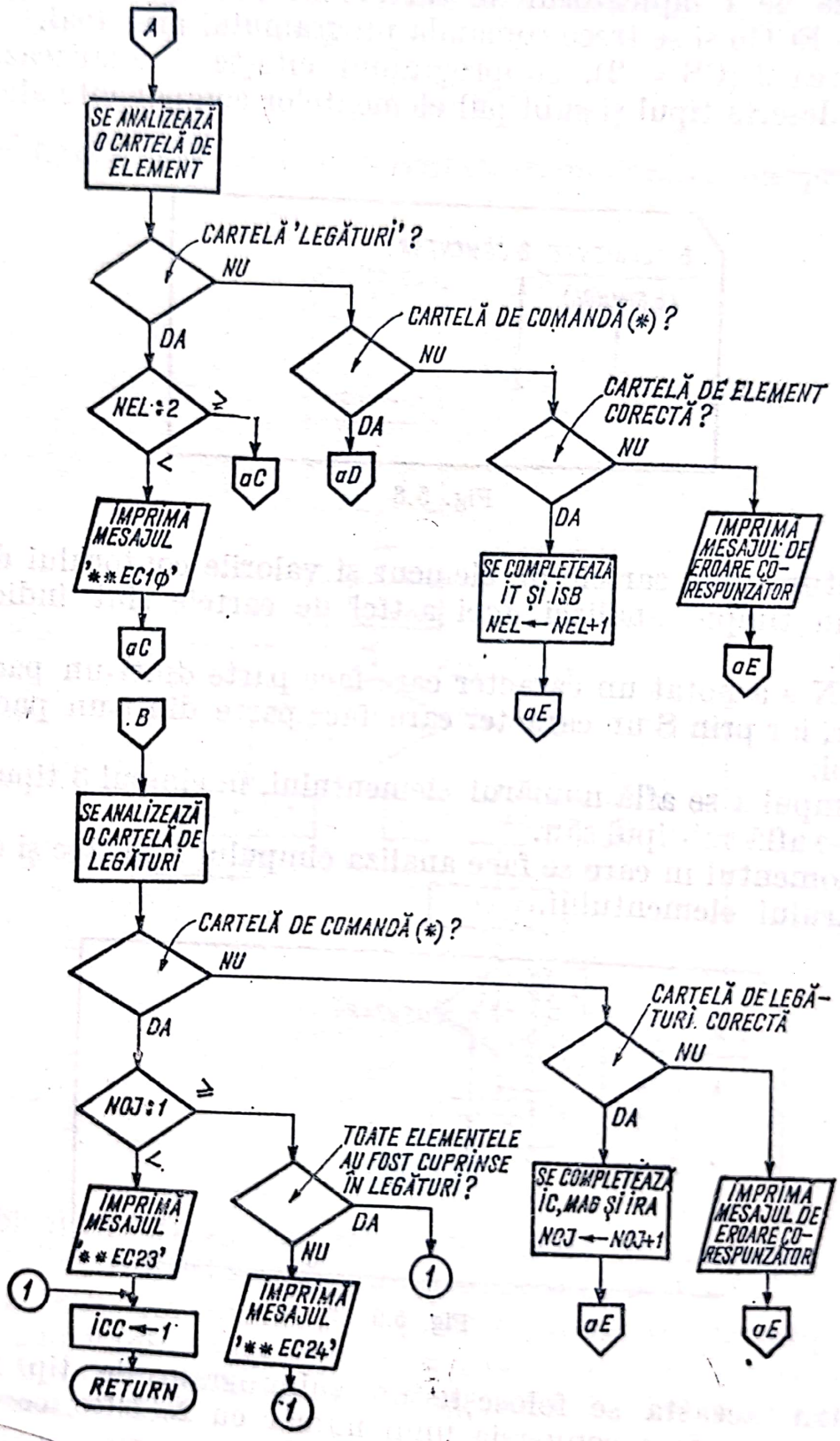

START
NEL ← ϕ
NOJ ← ϕ
IT (15) ← ϕ
ISB (15) ← ϕ
IC (3ϕ) ← ϕ
MAG (3ϕ) ← ϕ
IRA (3ϕ) ← ϕ
PM (15,22) ← ϕ
PA (15,22) ← ϕ
CS ← 1
1
E
CC ← 1
M1 (ϕ)
1
CS
3
bB
2
bA
SE ANALIZEAZĂ PRIMA CARTELĂ DUPĂ *STRUCTURA
CARTELĂ 'ELEMENTE' ?
NU
DA
C
CS ← CS+1
1
CARTELĂ DE COMANDĂ (*) ?
DA
D
NU
IMPRIMĂ MESAJUL '**ECϕ5'
RETURN
ICC ← 1
IMPRIMĂ MESAJUL '**ECϕ6'
RETURN

Fig. 5.7, a


A
SE ANALIZEAZĂ O CARTELĂ DE ELEMENT
CARTELĂ 'LEGĂTURI' ?
NU
DA
CARTELĂ DE COMANDĂ (*) ?
NU
DA
NEL : 2
≥
<
aC
aD
CARTELĂ DE ELEMENT CORECTĂ ?
NU
DA
IMPRIMĂ MESAJUL '** EC1φ'
SE COMPLETEAZĂ IT ŞI ISB
NEL ← NEL+1
IMPRIMĂ MESAJUL DE EROARE CORESPUNZĂTOR
aC
aE
aE
B
SE ANALIZEAZĂ O CARTELĂ DE LEGĂTURI
CARTELĂ DE COMANDĂ (*) ?
NU
DA
CARTELĂ DE LEGĂTURI CORECTĂ
NU
DA
NOJ : 1
≥
<
TOATE ELEMENTELE AU FOST CUPRINSE ÎN LEGĂTURI ?
DA
NU
SE COMPLETEAZĂ IC, MAG ŞI IRA
NOJ ← NOJ+1
IMPRIMĂ MESAJUL DE EROARE CORESPUNZĂTOR
IMPRIMĂ MESAJUL '** EC23'
IMPRIMĂ MESAJUL '** EC24'
1
1
1
ICC ← 1
RETURN
aE
aE

b

Fig. 5.7, b

poziţionează pe 1 indicatorul de cartelă de comandă (ICC), emite mesajul **ECØ6 şi se trece comanda programului principal.

În starea 2 (CS = 2), subprogramul citeşte şi analizează cartelele care descriu tipul şi subtipul elementelor componente ale structurii.

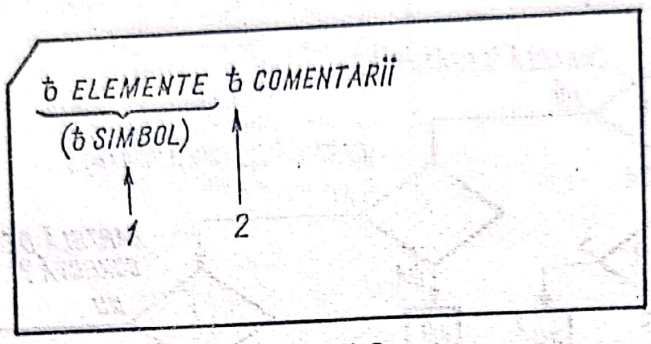


Fig. 5.8

Structura unei cartele de element şi valorile contorului de cîmpuri CC în timpul analizei unei astfel de cartele sînt indicate în figura 5.9.

Prin N s-a notat un caracter care face parte dintr-un pachet de tip număr, iar prin S un caracter care face parte dintr-un pachet de tip simbol.

În cîmpul 1 se află numărul elementului, în cîmpul 3 tipul iar în cîmpul 5 se află subtipul său.

În momentul în care se face analiza cîmpului 1 se face şi conversia numărului elementului.

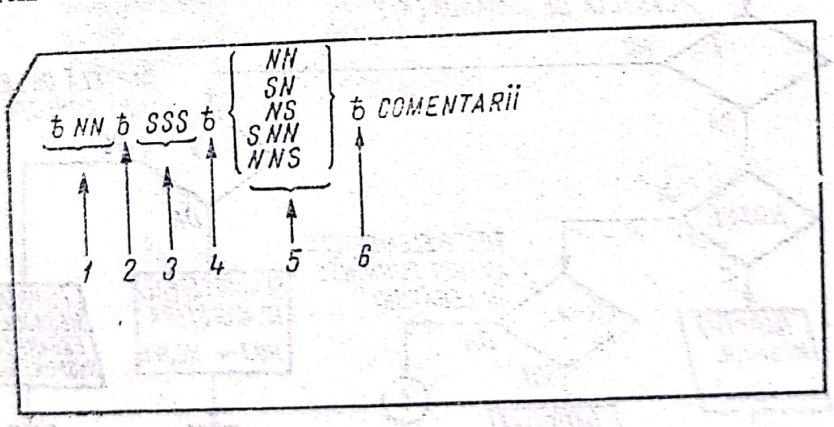


Fig. 5.9

Pentru aceasta se foloseşte un subprogram de tip funcţie, CONV(N), care face conversia unui număr cu N cifre ce se află într-un pachet de tip număr, din tabloul B2.

Numărul elementului analizat în momentul respectiv este păstrat în variabila L, iar numărul de caractere al pachetului din B2

Scanned with OKEN Scanner

se află în variabila NCR. Deci, valoarea variabilei L va fi atribuită cu o instrucţiune de forma

$$L = CONV(NCR)$$

În figura 5.10 este reprezentată organigrama subprogramului CONV.

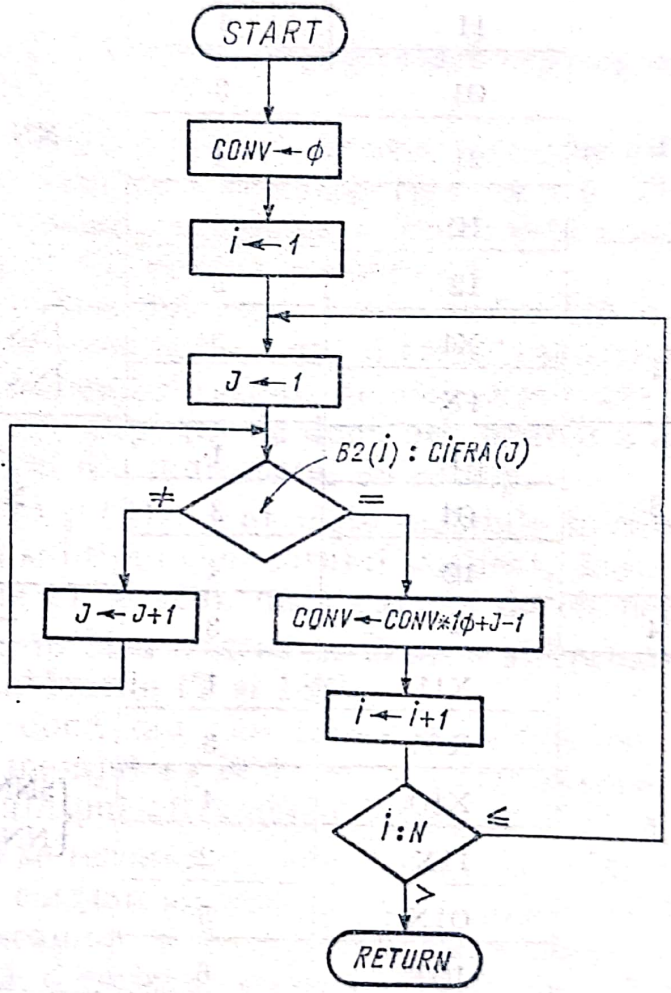


Fig. 5.10

Tabloul CIFRA este un tablou întreg de 1Ø elemente, care conţine codurile EBCDIC ale cifrelor, în ordinea de la 0 la 9.

Caracterele din tabloul B2 au fost împachetate de subprogramul M1. Ele sînt întotdeauna cifre şi ca atare vor avea fiecare un corespondent în tabloul CIFRA. De aceea, indicele J nu va depăşi niciodată valoarea 1Ø.

Codurile pentru tipurile şi subtipurile elementelor se stabilesc analizînd cîmpurile 3 şi 5, în conformitate cu tabelul 5.5 (v. tabelul 3.2).

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.5

Codurile de tip și subtip ale elementelor

Element	Codul de tip	Indicii de „stare" ai marginilor	Codul de subtip	Forma indicatorului de subtip	Clasa indicatorului de subtip
CIS	1	11	1	NN	1
		Ø1	3		
		21	4		
		1Ø	5		
		12	6		
CIL	2	X1	3	{SN NS}	2
		1X	4		
PLI	3	11	1	NN	1
		Ø1	3		
		1Ø	4		
PLA	4	—	3	—	—
CON	5	X11	1	{SNN NNS}	3
		XØ1	3		
		X1Ø	4		
		11X	2		
		Ø1X	5		
		1ØX	6		
SFC	6	X1	3	{SN NS}	2
		1X	4		
SFE	7	X11	1	{SNN NNS}	3
		XØ1	3		
		X1Ø	4		
		11X	2		
		Ø1X	5		
		1ØX	6		

Scanned with OKEN Scanner

Pentru stabilirea tipului, se compară simbolul din cîmpul 3 cu simbolurile de tip indicate în tabelul 5.5, după o metodă ca cea indicată la subprogramul ACC.

Din tabelul 5.5 se constată că din punctul de vedere al formei indicatorului de subtip, elementele pot fi împărţite în trei clase : NN, NS sau SN şi SNN sau NNS.

Analiza cîmpului 5 (de subtip) se face ţinînd seama de această observaţie.

În figura 5.11, a şi b este reprezentată organigrama de analiză a cîmpului de subtip.

Indicatorul INDT este un indicator care ţine evidenţa trecerilor prin secvenţa de analiză a subcîmpurilor de tip. El este poziţionat pe 1 la sfîrşitul analizei cîmpului 4. Pe durata analizei subtipului contorul de cîmpuri CC rămîne neschimbat.

Pentru elementele din clasa 1 este suficientă o singură trecere peste cîmpul 5. De aceea indicatorului INDT i se atribuie de la început valoarea 2. Pentru celelalte tipuri de elemente (care aparţin claselor 2 şi 3) cîmpul 5 este explorat de două ori, pentru a analiza atît simbolul cît şi numărul din indicatorul de subtip.

Indicatorii IT1 şi ISB1 sînt nişte variabile în care se memorează temporar tipul şi subtipul elementului analizat, înainte de a fi introduse în tablourile IT şi ISB, dacă cartela de element este corectă.

Prin urmare, în faza (starea) a doua a subprogramului STRUC se completează tablourile IT şi ISB.

Dacă există două sau mai multe elemente cu acelaşi număr, atunci se emite mesajul ** EC11 şi se completează în tabloul IT şi ISB tipul şi subtipul ultimului element întîlnit.

Această fază se termină în mod normal la întîlnirea unei cartele care în cîmpul 1 conţine un simbol cu mesajul 'LEGATURI' (fig. 5.12). Aceasta înseamnă că descrierea elementelor structurii s-a terminat şi urmează descrierea contururilor de asamblare a structurii.

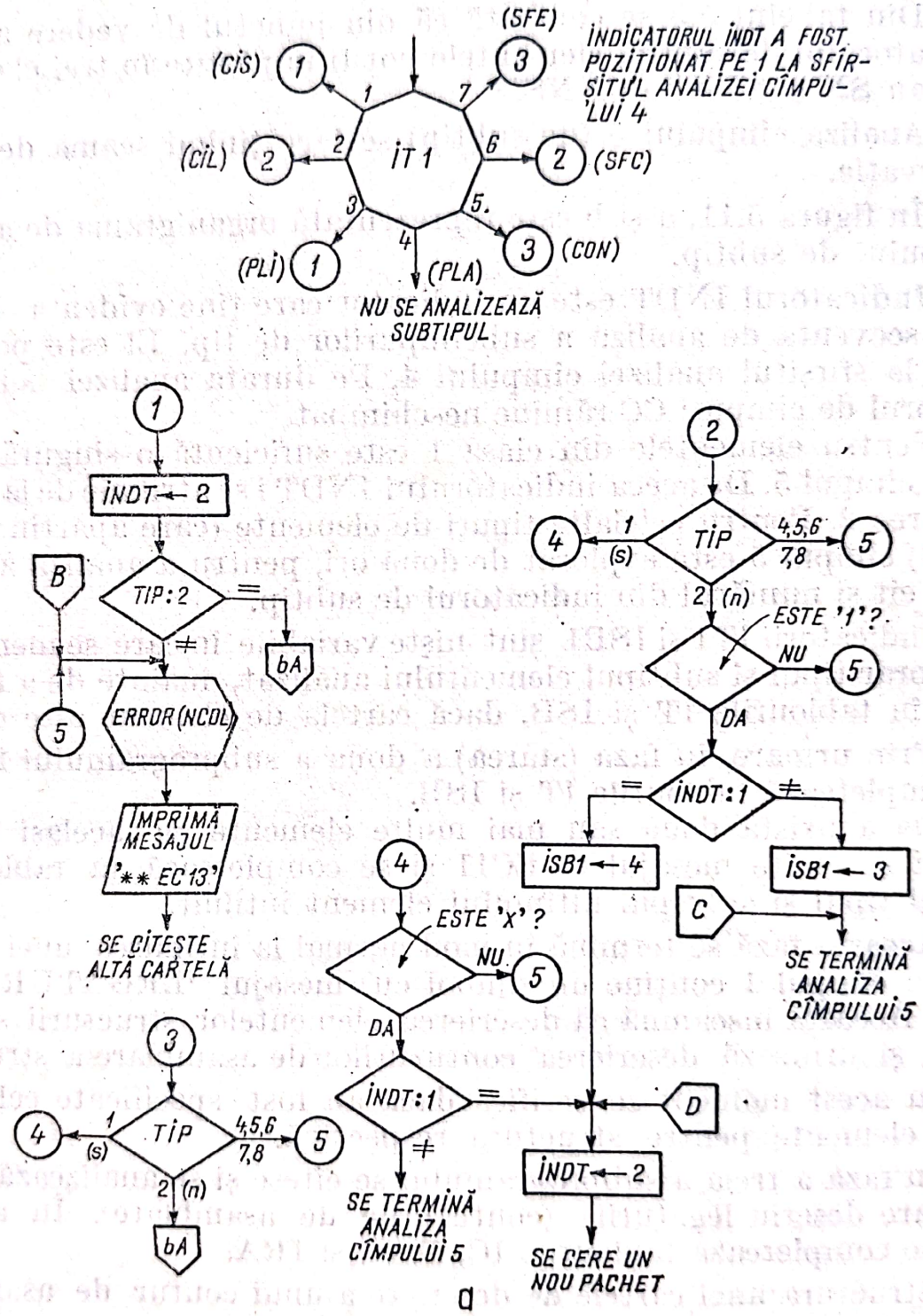
În acest moment se verifică dacă au fost specificate cel puţin două elemente pentru structura respectivă.

În faza a treia a subprogramului se citesc şi se analizează cartelele care descriu legăturile (contururile de asamblare). În această fază se completează tablourile IC, MAG şi IRA.

Structura unei cartele de descriere a unui contur de asamblare este indicată în figura 5.13.

În cîmpul 1 se află numărul conturului, iar în cîmpurile 3 numerele elementelor care sînt asamblate pe conturul respectiv. Blank-ul din cîmpul 3 nu este obligatoriu.

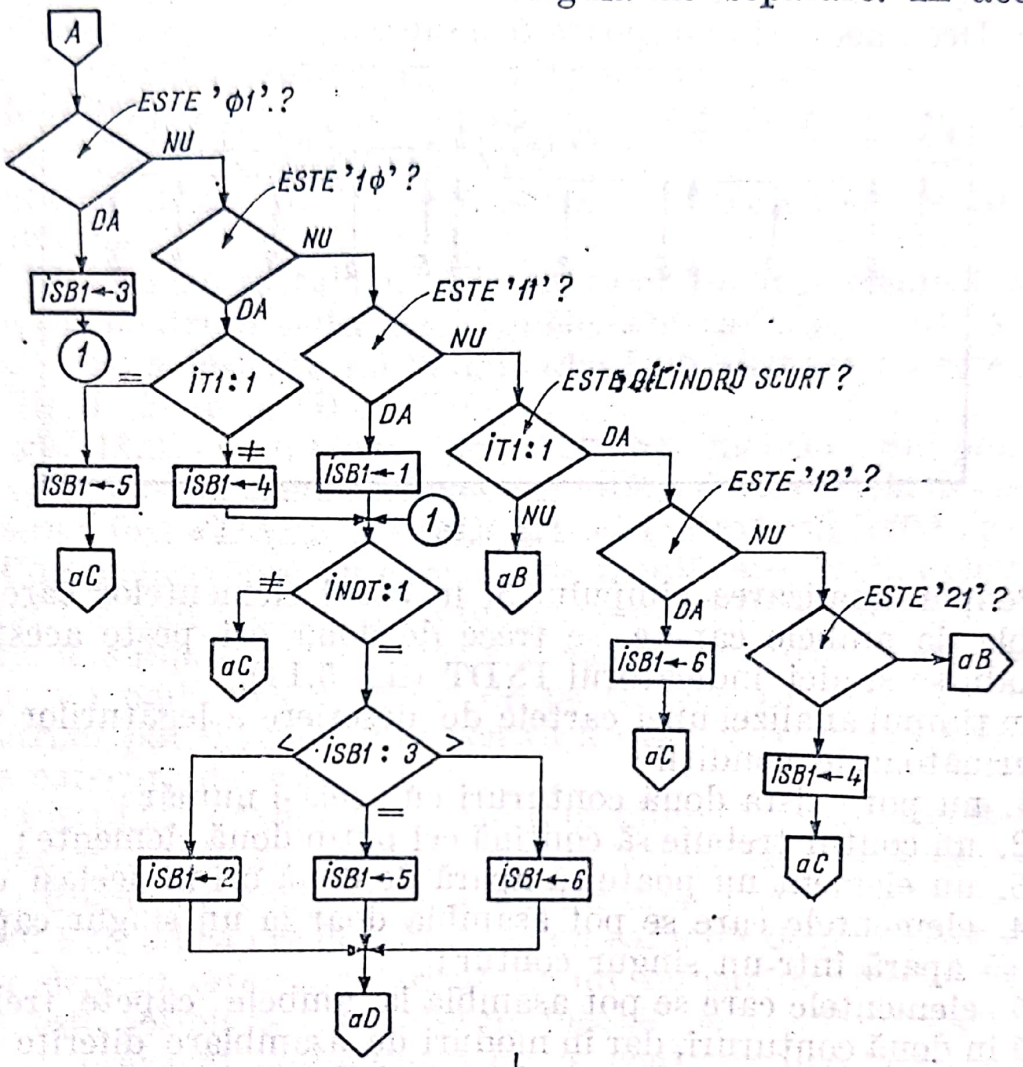
Scanned with OKEN Scanner


(SFE)
ÎNDICATORUL ÎNDT A FOST POZIȚIONAT PE 1 LA SFÎRȘITUL ANALIZEI CÎMPULUI 4
(CIS) 1
(CIL) 2
ÎT 1
(SFC) 2
(PLI) 1
(PLA)
(CON) 3
NU SE ANALIZEAZĂ SUBTIPUL
1
ÎNDT ← 2
B
TIP : 2
=
≠
bA
5
ERROR (NCOL)
IMPRIMĂ MESAJUL '** EC 13'
SE CITEȘTE ALTĂ CARTELĂ
2
TIP
4
1 (s)
4,5,6 7,8
5
2 (n)
ESTE '1'?
NU
5
DA
ÎNDT : 1
=
≠
ÎSB1 ← 4
ÎSB1 ← 3
C
SE TERMINĂ ANALIZA CÎMPULUI 5
4
ESTE 'X'?
NU
5
DA
ÎNDT : 1
=
≠
D
ÎNDT ← 2
SE TERMINĂ ANALIZA CÎMPULUI 5
SE CERE UN NOU PACHET
3
TIP
4
1 (s)
4,5,6 7,8
5
2 (n)
bA

a

Fig. 5.11, a

Blank-ul din cîmpul 4 nu este nici el obligatoriu atunci cînd după unmărul unui element urmează virgula de separare. În acest caz



b

Fig. 5.11, b

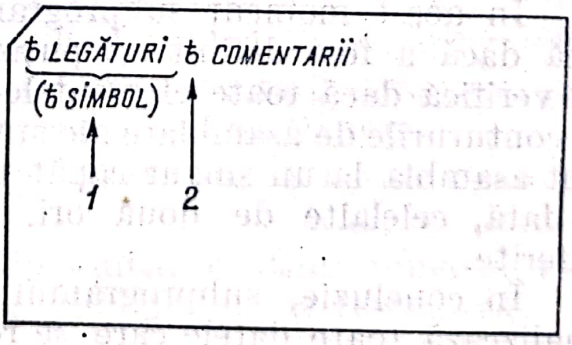


Fig. 5.12

cîmpul 4 poate să nu apară. El este obligatoriu atunci cînd după ultimul element urmează un comentariu.

Scanned with OKEN Scanner

Simbolul dintre parantezele drepte din cîmpul 3 are un singur caracter şi apare numai la elementele care se pot asambla la ambele capete. Deci, acest simbol poate fi I sau E.

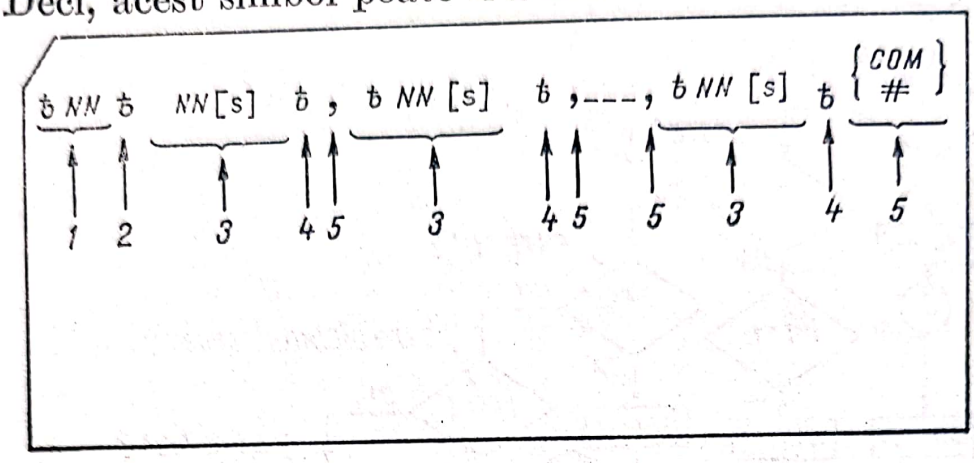


Fig. 5.13

Pentru analizarea cîmpului 3, în cazul elementelor care se pot asambla la ambele capete, se trece de două ori peste acest cîmp, folosindu-se şi aici indicatorul INDT (fig. 5.14).

În timpul analizei unei cartele de descriere a legăturilor se verifică următoarele condiţii :

1. nu pot exista două contururi cu acelaşi număr ;
2. un contur trebuie să conţină cel puţin două elemente ;
3. un element nu poate să apară de două ori în acelaşi contur ;
4. elementele care se pot asambla doar la un singur capăt trebuie să apară într-un singur contur ;
5. elementele care se pot asambla la ambele capete trebuie să apară în două contururi, dar în moduri de asamblare diferite (E şi I).

Această fază a subprogramului STRUC se termină la întîlnirea unei cartele de comandă, adică o cartelă care conţine un asterisc în cîmpul 1 (în mod normal * DATE).

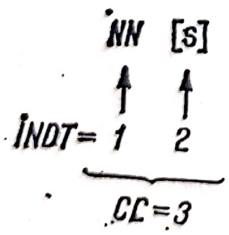


Fig. 5.14

În acest moment subprogramul STRUC verifică dacă a fost definit cel puţin un contur. Apoi se verifică dacă toate elementele definite participă la contururile de asamblare ale structurii. Cele care se pot asambla la un singur capăt trebuie să participe o dată, celelalte de două ori, la două contururi diferite.

În concluzie, subprogramul STRUC citeşte şi analizează toate datele care se referă la descrierea „calitativă" a structurii (v. § 4.1.). El completează tabelele IT, ISB, IC, MAG şi IRA, care se folosesc la construirea matricei sistemului de ecuaţii al constantelor de integrare.

Scanned with OKEN Scanner

5.5. Subprogramul de citire a parametrilor

După definirea „calitativă" a structurii trebuie introduşi parametrii elementelor (geometrici, de material şi ai sarcinilor). În acest scop, utilizatorul introduce cartela de comandă *DATE, urmată de cartelele de descriere a parametrilor. Aceste cartele sînt citite şi interpretate de subprogramul DATA.

Subprogramul DATA are acces la următoarele tablouri din zona comună:

1. IT(15): acest tablou conţine tipul fiecărui element definit. Este folosit pentru a vedea dacă un element care apare într-o cartelă de parametri, a fost sau nu definit (dacă un element nu este definit atunci tipul său este Ø).

2. PM(15,22): tabloul parametrilor metrici. Subprogramul DATA completează elementele acestui tablou dacă cartela de comandă anterioară a fost *DATE METRIC, adică indicatorul ISTA are valoarea 1. Completarea are un caracter de modificare. Iniţial elementele tabloului PM sînt anulate de subprogramul STRUC. Apoi, la fiecare chemare a subprogramului DATA valorile acestor elemente sînt înlocuite cu noile valori, citite de pe cartele. În acest fel valorile parametrilor pot fi modificate pentru a calcula structura într-o succesiune oarecare de variante.

3. PA(15,22): tabloul parametrilor adimensionali. Acest tablou este completat dacă mai înainte s-a citit cartela de comandă *DATE ADIM. Modul de completare a acestui tablou este identic cu cel al tabloului PM, adică are de asemenea un caracter de modificare.

Un element este caracterizat de un număr de maxim 22 parametri şi este posibil ca aceştia să nu încapă pe o singură cartelă. De aceea, s-a prevăzut posibilitatea de a continua descrierea parametrilor unui element pe mai multe cartele. Numărul maxim admis de cartele de continuare este 9.

De asemenea, s-a prevăzut posibilitatea introducerii valorilor unor parametri simultan pentru toate elementele.

În figura 5.15 este reprezentată structura unei cartele de parametri, urmată de o cartelă de continuare.

În cîmpul 1 se poate afla un pachet de tip număr, sau un pachet de tip simbol.

Pachetul de tip număr conţine numărul elementului ai cărui parametri sînt specificaţi pe cartela respectivă.

Pachetul de tip simbol trebuie să conţină mesajul 'CONSTANTE' şi indică faptul că parametrii specificaţi pe cartela respectivă vor avea aceleaşi valori pentru toate elementele.

Scanned with OKEN Scanner

În cîmpul 3 se află numărul primului parametru specificat.

Cîmpul 5 conține un număr în virgulă mobilă (n.v.m.), care reprezintă valoarea parametrului respectiv.

O cartelă de parametri, trebuie să conțină cel puțin un parametru, înainte de a fi urmată de o cartelă de continuare. De aici provine

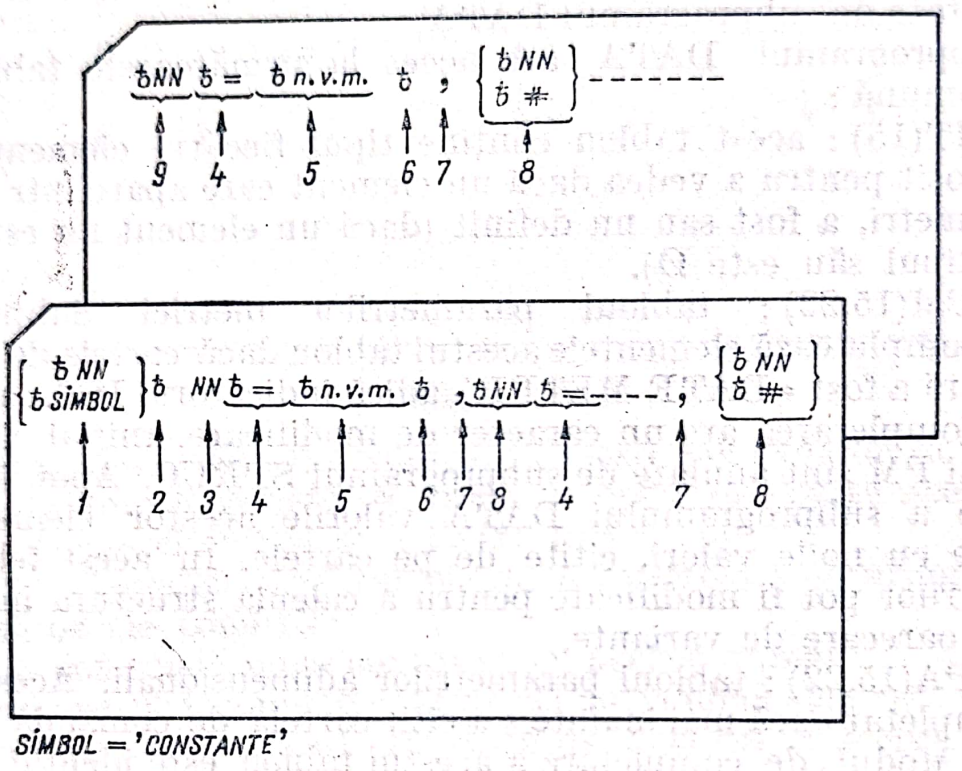


Fig. 5.15

diferența dintre cîmpurile 3 și 8. În cîmpul 8 (care urmează după o virgulă) se admite existența unui pachet de tip terminator (#), ceea ce înseamnă că va urma o cartelă de continuare.

Blank-urile din cîmpurile 4, 5 și 8 sînt facultative. Blank-ul din cîmpul 6 nu este nici el obligatoriu. El trebuie introdus dacă utilizatorul dorește să adauge un comentariu după ultimul parametru descris. Comentariul însă, nu trebuie să înceapă cu o virgulă.

Cîmpul 9 se aseamănă cu cîmpul 3, dar în acest cîmp poate să apară un asterisc (*), care este indicatorul unei cartele de comandă. Aceasta este o situație de eroare, deoarece se aștepta o cartelă de continuare. În acest caz, subprogramul DATA își încheie activitatea și intră în acțiune subprogramul ACC. Astfel, cartela de comandă nu este ignorată.

În figurile 5.16, a și b este reprezentată organigrama de principiu a subprogramului DATA.

Scanned with OKEN Scanner

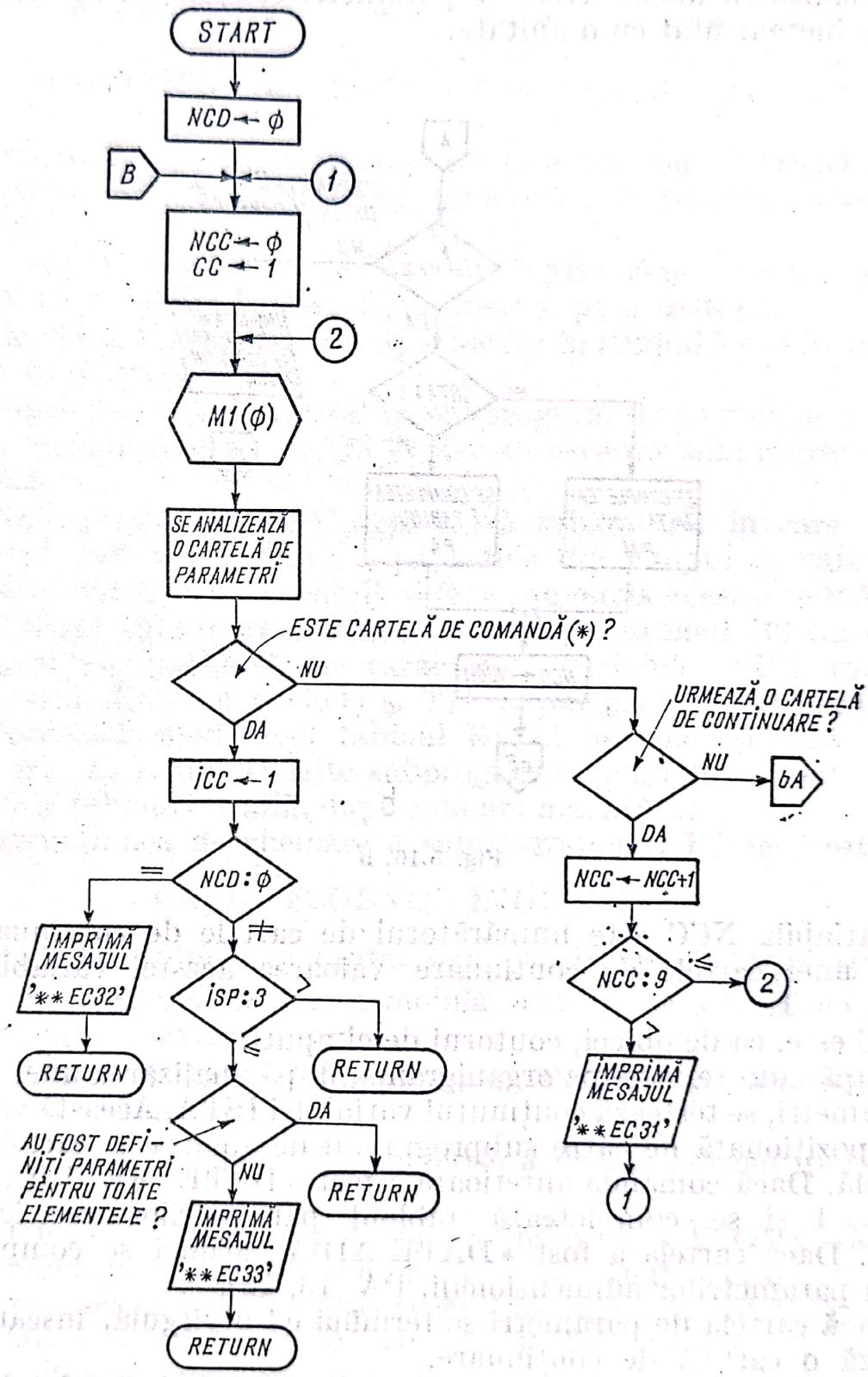
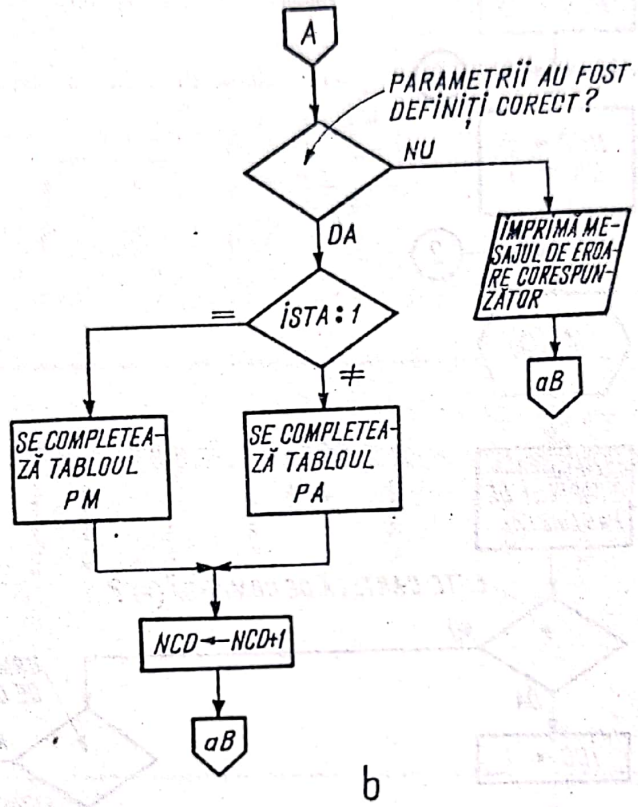

START
NCD ← ϕ
B
1
NCC ← ϕ
CC ← 1
2
M1(ϕ)
SE ANALIZEAZĂ O CARTELĂ DE PARAMETRI
ESTE CARTELĂ DE COMANDĂ (*) ?
NU
DA
URMEAZĂ O CARTELĂ DE CONTINUARE ?
NU
bA
DA
ICC ← 1
NCC ← NCC+1
NCD : ϕ
=
≠
NCC : 9
≤
>
2
IMPRIMĂ MESAJUL '** EC32'
ISP : 3
>
≤
IMPRIMĂ MESAJUL '** EC31'
RETURN
RETURN
RETURN
DA
AU FOST DEFINITI PARAMETRI PENTRU TOATE ELEMENTELE ?
NU
IMPRIMĂ MESAJUL '** EC33'
RETURN
1

Fig. 5.16, a

Variabila NCD este numărătorul de cartele de parametri. După analizarea unei cartele de parametri conţinutul acestei variabile este incrementat cu o unitate.



b

Fig. 5.16, b

Variabila NCC este numărătorul de cartele de continuare. La citirea unei cartele de continuare valoarea acestei variabile este mărită cu 1.

CC este, ca de obicei, contorul de cîmpuri.

După cum se vede pe organigramă, după analizarea unei cartele de parametri, se testează conţinutul variabilei ISTA. Această variabilă a fost poziţionată de către subprogramul de analiză a cartelelor de comandă. Dacă comanda anterioară a fost *DATE METRIC, atunci ISTA = 1 şi se completează tabloul parametrilor metrici, PM (15,22). Dacă cartela a fost *DATE ADIM, atunci se completează tabloul parametrilor adimensionali, PA (15, 22).

Dacă cartela de parametri se termină cu o virgulă, înseamnă că urmează o cartelă de continuare.

Tablourile de parametri nu se completează decît după ce au fost citite toate cartelele de continuare ale unei instrucţiuni de parametri.

Scanned with OKEN Scanner

Dacă pachetul din cîmpul 1 este de tip număr, atunci tabelele de parametri se completează numai pe linia corespunzătoare elementului respectiv. Determinarea numărului elementului se face tot cu subprogramul CONV, care analizează pachetul de tip număr din cîmpul 1.

Dacă pachetul este simbol şi conţine mesajul 'CONSTANTE', atunci parametrii specificaţi se completează pentru toate elementele structurii.

În timpul analizei, se are în vedere faptul că nu se poate specifica de două ori valoarea aceluiaşi parametru, pe o cartelă.

Valorile parametrilor sînt specificate în cîmpul 5 sub forma unor numere în virgulă mobilă.

Cîmpul 5 este analizat de un subprogram de conversie a numerelor în virgulă mobilă, FCONV. Acesta este un subprogram de tip subrutină.

Subprogramul FCONV explorează tabloul B1 în care se află conţinutul cartelei, analizează pachetele din cîmpul 5, care reprezintă un număr în virgulă mobilă şi face conversia acestui număr. Evident că acest subprogram foloseşte, de fapt, tabloul B2 (în care se află asamblate pachetele de caractere), variabila NCR (numărul de caractere dintr-un pachet) şi TIP (tipul pachetului) deoarece el nu explorează în mod direct tabloul B1, ci se foloseşte de subprogramul M1, ca toate celelalte subprograme de analiză. Toate aceste variabile şi tablouri se află, după cum am mai arătat, în zona comună.

Instrucţiunea de chemare a subprogramului FCONV este

CALL FCONV(X, INDE, IN)

Parametrii dintre paranteze au următoarea semnificaţie:

— X: variabilă în virgulă mobilă, căreia i se atribuie valoarea obţinută prin conversie;

— INDE: indicator poziţionat de FCONV şi care poate lua următoarele valori întregi:

INDE = 1: operaţia de conversie a decurs normal (nu există erori);

INDE = 2: cartela s-a terminat înainte ca FCONV să întîlnească numărul în virgulă mobilă. Această situaţie poate să apară la analiza unei cartele de afişaj (vezi subprogramul ACE, § 5.6);

INDE = 3: numărul în virgulă mobilă începe cu asterisc. Această situaţie poate să apară la analiza cartelelor de continuare a unei cartele de afişaj, analiză efectuată de subprogramul ACE (vezi § 5.6);

INDE = 4: eroare sintactică în număr în virgulă mobilă.

Scanned with OKEN Scanner

Acest indicator este testat de programul chemător, pentru a determina modul în care a decurs operaţia de conversie.

3. IN : indicator poziţionat de programul chemător, care informează subprogramul cum va cere subprogramului M1 primul pachet pe care îl va analiza :

— IN = 0 : pachetul este furnizat de pe o cartelă nouă (M1 va citi o cartelă). Această situaţie este întîlnită tot la analiza unei cartele de continuare a unei cartele de afişaj ;

— IN = 1 : pachetul este furnizat de pe cartela care se analizează în momentul respectiv.

Valorile parametrilor pot fi scrise pe cartela de parametri în diverse forme cărora în limbajul FORTRAN le-ar corespunde formatele I (adică un număr fără punct zecimal), F (cu punct zecimal) sau E (cu mantisă şi exponent).

Forma cea mai generală ar corespunde formatului E şi anume

$$\pm \text{m.n E} \pm \text{e}$$

unde m este partea întreagă, n partea zecimală, iar e exponentul.

Acestui format îi corespunde forma din figura 5.17.

Simbolul trebuie să aibă un singur caracter şi anume caracterul E.

Variabila CCN este contorul de cîmpuri care se foloseşte la analiza numărului. Valorile sale au fost trecute în figura 5.17.

Celelalte forme de scriere a numerelor se obţin prin eliminarea unor cîmpuri din forma generală.

Pe parcursul analizei numărului, programul FCONV atribuie valori unor variabile şi anume :

1. ISM : această variabilă este indicatorul de semn al mantisei, valoarea ei fiind stabilită în urma analizei cîmpului 1, şi anume :

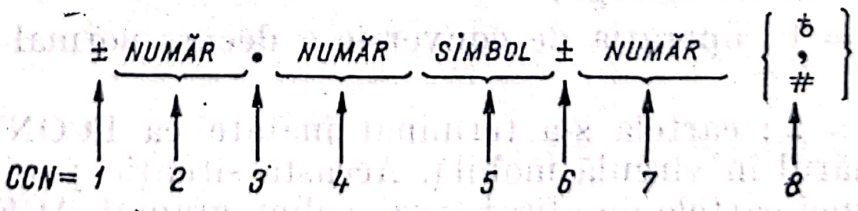


Fig. 5.17

a) Ø : dacă cîmpul 1 nu există (sau este blank) sau dacă în cîmpul 1 se află semnul plus (+) ;

b) 1 : dacă în cîmpul 1 se află semnul minus (—) ;

2. PI : conține partea întreagă a numărului, obținută prin analiza cîmpului 2 și conversia pachetului din acest cîmp, cu ajutorul funcției CONV și reprezintă valoarea lui m din formatul E ;

3. PZ : conține partea zecimală a numărului, obținută prin analiza cîmpului 4 și reprezintă valoarea lui Ø. n din formatul E ;

4. ISE : este indicatorul de semn al exponentului și se obține din analiza cîmpului 6 și capătă valorile :

a) Ø : dacă cîmpul 6 nu există (sau este blank) sau dacă în cîmpul 6 se află semnul plus (+) ;

b) 1 : dacă în cîmpul 6 se află semnul minus (—) ;

5. EXP : conține valoarea exponentului, care se obține din analiza cîmpului 7 și reprezintă valoarea lui e din formatul E.

Inițial, acestor variabile li se atribuie valoarea zero. La sfîrșitul analizei, valoarea numărului se determină cu relația

$$X = (-1)^{ISM}(PI + PZ) \times 10^{(-1)^{ISE} EXP}$$

Dacă unele cîmpuri lipsesc, atunci variabilele corespunzătoare acestor cîmpuri sînt nule și relația rămîne valabilă.

Activitatea subprogramului DATA se încheie cu citirea unei cartele de comandă, adică o cartelă care conține un asterisc în cîmpul 1 (de exemplu * REZOLVA).

Se testează variabila NCD pentru a se verifica dacă a fost citită cel puțin o cartelă de parametri.

Dacă cartela * DATE, care a precedat cartelele de parametri, este prima folosită pentru structura respectivă (ISP = 3), adică se atribuie valori inițiale parametrilor, se verifică dacă s-au atribuit valori pentru parametrii tuturor elementelor structurii.

După această verificare, se trece din nou în programul principal, care cheamă subprogramul ACC, pentru a analiza cartela de comandă semnalată de subprogramul DATA.

5.6. Subprogramul de analiză a instrucțiunilor de afișare

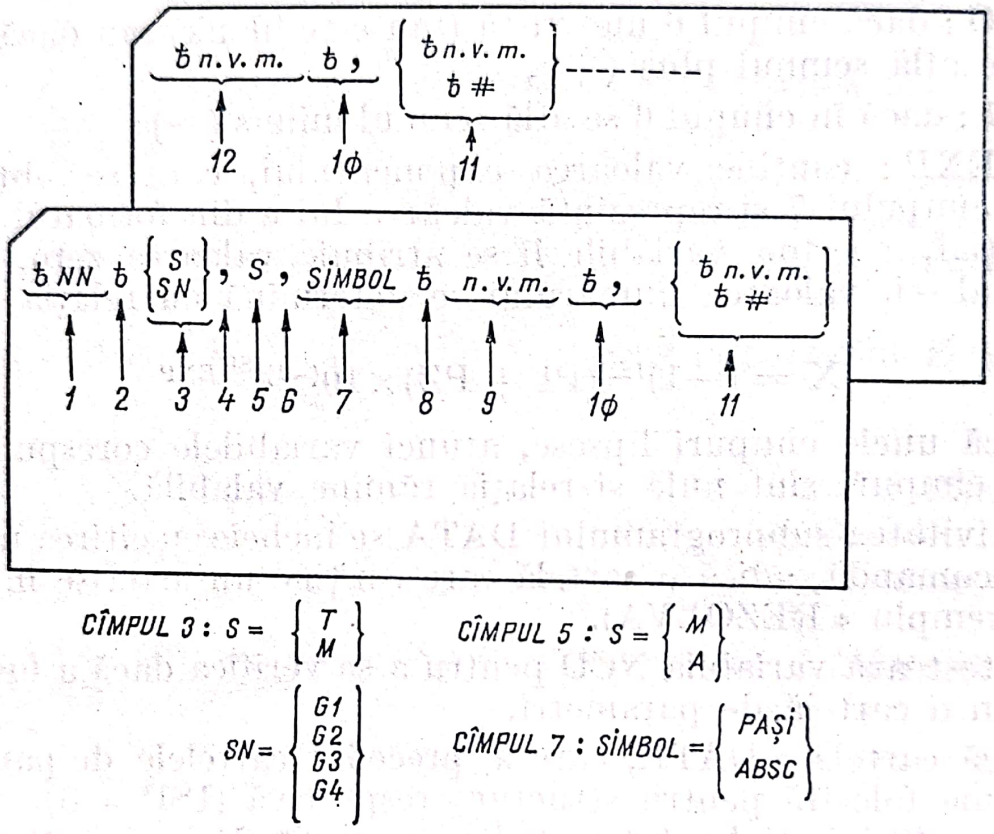
Scopul final al programului STAXIS este de a calcula tensiunile care apar în diferite puncte ale unei structuri axial simetrice și de a afișa valorile acestora.

Pentru a permite urmărirea și interpretarea acestor rezultate în diferite scopuri, s-a prevăzut posibilitatea afișării tensiunilor în mai multe moduri (v. § 4.5).

Scanned with OKEN Scanner

Descrierea modului de afişare a rezultatelor se face cu ajutorul unor cartele de afişaj (sau redactare), care sînt analizate cu ajutorul subprogramului ACE.

Pe o cartelă de afişaj se indică elementul în punctele căruia se calculează tensiunile, modul de redactare a rezultatelor şi abscisele secţiunilor în care se face calculul.



CÎMPUL 3 : S = { T / M } CÎMPUL 5 : S = { M / A }

SN = { G1 / G2 / G3 / G4 } CÎMPUL 7 : SIMBOL = { PAŞI / ABSC }

Fig. 5.18

În anumite cazuri, aceste informaţii nu pot fi înregistrate pe o singură cartelă şi de aceea o cartelă de afişaj poate fi urmată de un număr de cartele de continuare (cel mult 9).

Structura unei cartele de afişaj şi a unei cartele de continuare este reprezentată în figura 5.18.

Numărul din cîmpul 1 reprezintă numărul elementului ale cărui tensiuni trebuie calculate. Pentru determinarea lui se foloseşte subprogramul CONV.

În cîmpul 3 se indică modul de redactare a rezultatelor, cîmpul 5 indică tipul absciselor (metrice sau adimensionale), cîmpul 7 indică modul în care sînt definite abscisele iar cîmpurile 9, 11 şi 12 conţin numere în virgulă mobilă (n. v. m), care indică valorile absciselor. Diferenţa dintre cîmpurile 9 şi 11 constă în faptul că pe prima car-

telă trebuie să existe cel puţin o abscisă. Cîmpul 12 este primul dintr-o cartelă de continuare şi în anumite situaţii de eroare, în el se poate afla un asterisc, deoarece utilizatorul a uitat să introducă cartela de continuare şi a introdus o cartelă de comandă. Această cartelă este analizată de ACC.

Cîmpurile 9, 11 şi 12 sînt analizate tot de subprogramul FCONV, care face conversia numerelor în virgulă mobilă.

Dacă abscisele sînt date prin paşi, atunci nu se iau în considerare decît primele trei numere de pe cartelă. Primul număr reprezintă valoarea iniţială a absciselor, al doilea numărul de abscise, iar al treilea incrementul absciselor.

Dacă abscisele se indică în mod explicit, atunci numărul lor nu poate depăşi 20.

În urma analizei unei cartele de execuţie, subprogramul ACE atribuie valori următoarelor elemente din zona comună :

1. L : conţine numărul elementului ale cărui tensiuni se calculează. Această valoare se obţine analizînd cîmpul 1 ;

2. IR : este indicatorul de redactare şi poate să ia următoarele valori :

a) 1 : dacă în cîmpul 3 se află caracterul T, care semnifică afişarea tuturor tensiunilor ce se calculează ;

b) 2 : dacă în cîmpul 3 se află caracterul M, care semnifică afişarea tensiunilor maxime (în valoare absolută) ;

c) 3, 4, 5, 6 : dacă în cîmpul 3 se află grupul G1, G2, G3 respectiv G4, care cere să se traseze graficul uneia din cele 4 tensiuni ;

3. ITA : indicatorul tipului absciselor :

a) ITA = 1 : abscisele sînt metrice ;

b) ITA = 2 : abscisele sînt adimensionale.

Dacă parametrii introduşi au fost metrici, abscisele pot fi metrice sau adimensionale ; dar dacă parametrii au fost adimensionali, abscisele nu pot fi decît adimensionale ;

4. INDA : indicatorul modului de definire a absciselor ;

a) INDA = 0 : abscisele sînt definite prin paşi ;

b) INDA = 1 : abscisele sînt definite explicit ;

5. NABS : conţine numărul absciselor sau numărul de paşi ;

6. TABS(20) : conţine valorile absciselor. Dacă abscisele sînt definite prin paşi, atunci TABS(1) conţine valoarea iniţială, iar TABS(2) conţine incrementul.

Avînd la dispoziţie aceste variabile, programul principal (STAXIS) poate să calculeze şi să afişeze tensiunile, aşa cum doreşte utilizatorul.

Organigrama de principiu a subprogramului ACE este reprezentată în figura 5.19.

Scanned with OKEN Scanner

Spre deosebire de celelalte subprograme de analiză (STRUC, DATA), subprogramul ACE citește o singură cartelă (împreună cu eventualele cartele de continuare) și apoi execuția se trece programului principal.

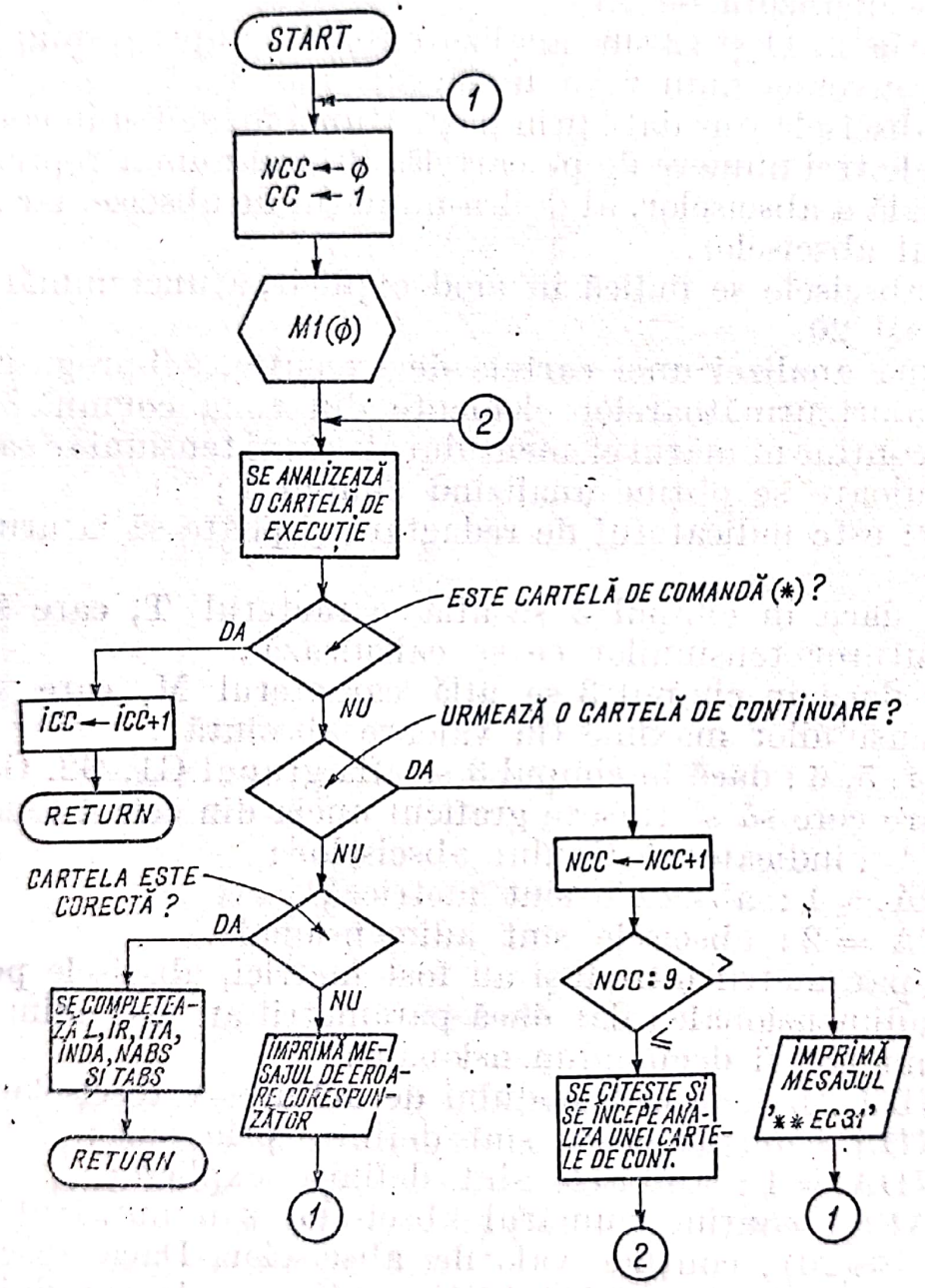


Fig. 5.19

În cazul în care apare o eroare, subprogramul ACE citește cartela următoare, pe care o analizează. În acest fel, dacă o cartelă de afișare este eronată, ea este semnalată și nu se mai face calculul tensiunilor pentru elementul respectiv. Dacă următoarea cartelă este corectă, atunci se calculează și se afișează tensiunile corespunzătoare.

Scanned with OKEN Scanner

O altă particularitate a subprogramului ACE constă în faptul că la detectarea unei erori, nu se incrementează indicatorul IERR ci IERR1, deoarece o eroare într-o cartelă de afişare nu stînjeneşte funcţionarea corectă, în continuare, a programului (v. § 5.1).

Dacă subprogramul ACE întîlneşte o cartelă de comandă, adică o cartelă care are în cîmpul 1 un asterisc, atunci înseamnă că secvenţa de afişare a tensiunilor s-a terminat şi utilizatorul doreşte să modifice parametrii structurii respective sau să analizeze o structură nouă. Programul principal cheamă subprogramul ACC pentru a stabili tipul cartelei de comandă întîlnită.

5.7. Subprogramele specifice tipurilor de elemente. Alte subprograme

Algoritmul conceput pentru calculul structurilor axial simetrice a presupus că o anumită structură se descompune, convenabil, într-un număr de elemente de diverse tipuri : placă plană circulară, placă plană inelară, înveliş cilindric scurt, înveliş cilindric lung, înveliş conic, înveliş sferic cu o margine (calotă sferică) şi înveliş sferic cu două margini (v. cap. 3).

Pe de altă parte, relaţiile pentru calculul deplasărilor, eforturilor şi tensiunilor celor şapte tipuri de elemente enumerate mai sus sînt complet diferite (v. cap. 2 şi 3). Acest considerent, împreună cu altele privind organizarea de ansamblu a programului STAXIS, au condus la ideea scrierii cîte unui subprogram pentru fiecare tip de element. Acestea au primit denumirile elementelor respective : PLA, PLI, CIS, CIL, CON, SFC, SFE.

Observaţie. Din motive privind utilizarea raţională a memoriei calculatorului, subprogramul CON a fost divizat în două subrutine : CON1 şi CON2. Pentru a simplifica prezentarea, în cele ce urmează se vor face menţiuni la ansamblul instrucţiunilor pentru învelişul conic şi se va folosi notaţia CON.

Sarcinile principale ale oricărui subprogram specific unui tip de element sînt :

— calculul parametrilor adimensionali (dacă datele s-au introdus ca mărimi metrice) ;

— completarea matricei sistemului de ecuaţii al constantelor de integrare ;

— calculul tensiunilor.

Dacă calculul parametrilor adimensionali este o operaţie foarte simplă, completarea matricei sistemului de ecuaţii este mai dificilă, pentru aceasta fiind necesare următoarele precizări :

Scanned with OKEN Scanner

— ecuaţiile elementelor care se asamblează (se leagă) la ambele capete (subtip 1 şi 2) conţin patru constante de integrare, deci elementele respective vor completa patru coloane în matricea sistemului; celelalte elemente — două coloane;

— fiecare contur de asamblare a k_e elemente, permite scrierea a $2k_e$ ecuaţii (v. § 3.2) şi deci completarea a $2k_e$ linii în matricea sistemului;

— pentru a stabili rangul coloanei din matricea sistemului de ecuaţii care corespunde unei anumite constante de integrare din ecuaţiile unui element, se numerotează aceste constante în ordinea în care sînt definite elementele în tabloul de tip IT (15) (v. § 5.4) şi se admite că rangul coloanei este egal cu numărul de ordine al constantei de integrare. Rezultă că ordinea coloanelor matricei sistemului de ecuaţii se stabileşte cînd se numerotează elementele structurii;

— numerotarea liniilor matricei sistemului de ecuaţii este dată de numărătoarea contururilor de asamblare a elementelor şi de faptul că pentru fiecare contur se scriu $2k_e$ ecuaţii. Ordinea în care se scriu aceste ecuaţii este cea precizată la § 3.2.

Pentru ca un subprogram al unui element să ştie poziţiile coeficienţilor, din matricea sistemului, pe care trebuie să-i calculeze, s-au elaborat două subprograme de tip funcţie denumite JIK şi IK.

Fiind dat un element L, funcţia JIK comunică subprogramului care corespunde elementului L, indicele ultimei coloane completate. Subprogramul de element va introduce coeficienţii calculaţi de el în următoarele două sau patru coloane.

Organigrama subprogramului JIK este reprezentată în figura 5.20.

El este apelat cu o instrucţiune de forma

$$J\emptyset = JIK(L)$$

Deoarece nu este obligatoriu ca numerele elementelor să fie în ordine succesivă, subprogramul JIK explorează tabloul IT şi ţine cont doar de elementele definite. Explorarea tabloului IT se face pînă la un index mai mic cu 1 decît numărul elementului L (pînă la L — 1).

Subprogramul IK, a cărui organigramă este reprezentată în figura 5.21, furnizează subprogramului chemător indicele ultimei linii completate, el urmînd să-şi plaseze coeficienţii pe care îi calculează în următoarele $2k_e$ linii.

Subprogramul IK este apelat cu o instrucţiune de forma

$$I\emptyset = IK(K)$$

Scanned with OKEN Scanner

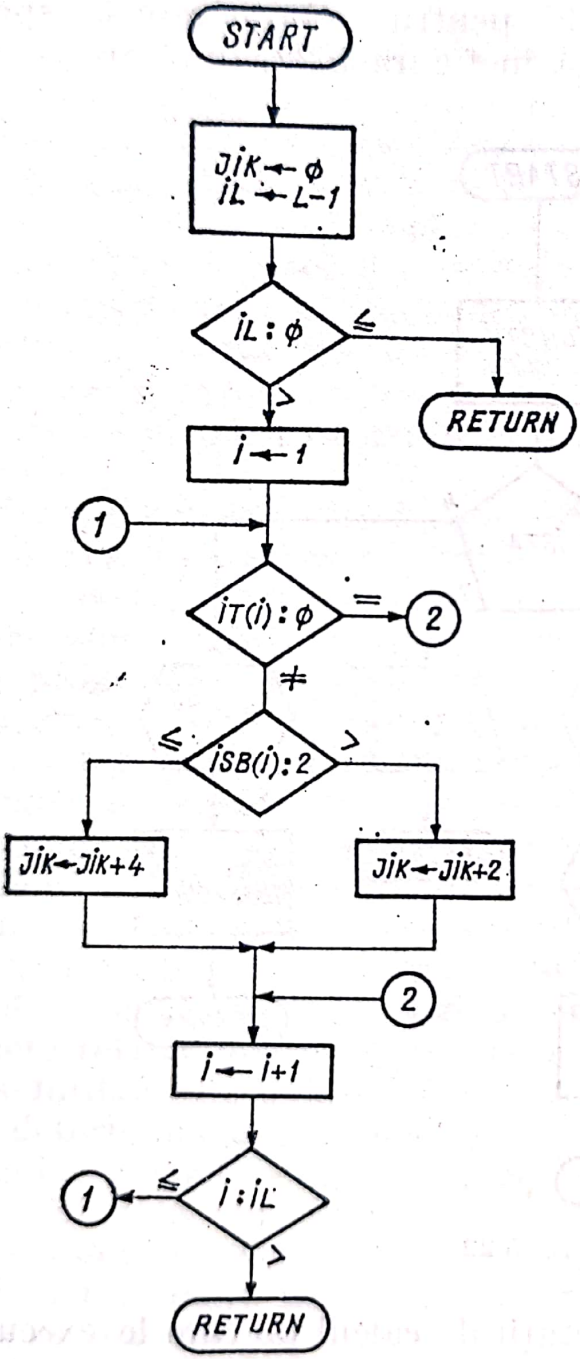


Fig. 5.20

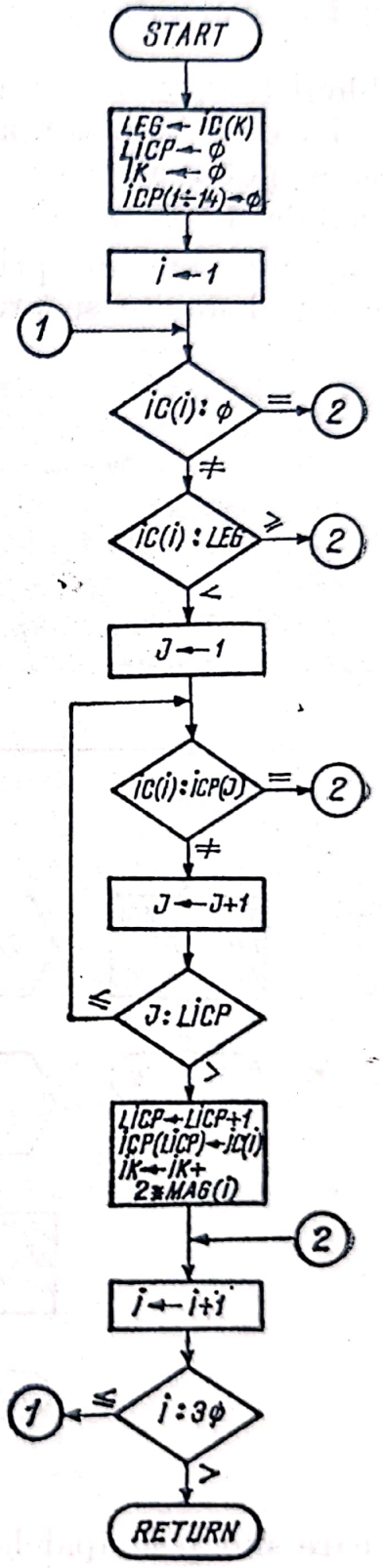


Fig. 5.21

Scanned with OKEN Scanner

unde K = 2L − 1, dacă se completează liniile corespunzătoare marginii I a elementului, sau K = 2L dacă este vorba de marginea E.

Tabloul ICP(14) este un tablou ajutător în care se ţine evidenţa contururilor de asamblare parcurse. El are 14 locaţii, deoarece cu 15 elemente se pot realiza cel mult 14 contururi de asamblare.

Variabila LICP este un index de completare a tabloului ICP.

O organigramă de principiu pentru subprogramele specifice tipurilor de elemente se prezintă în figura 5.22, din care se poate

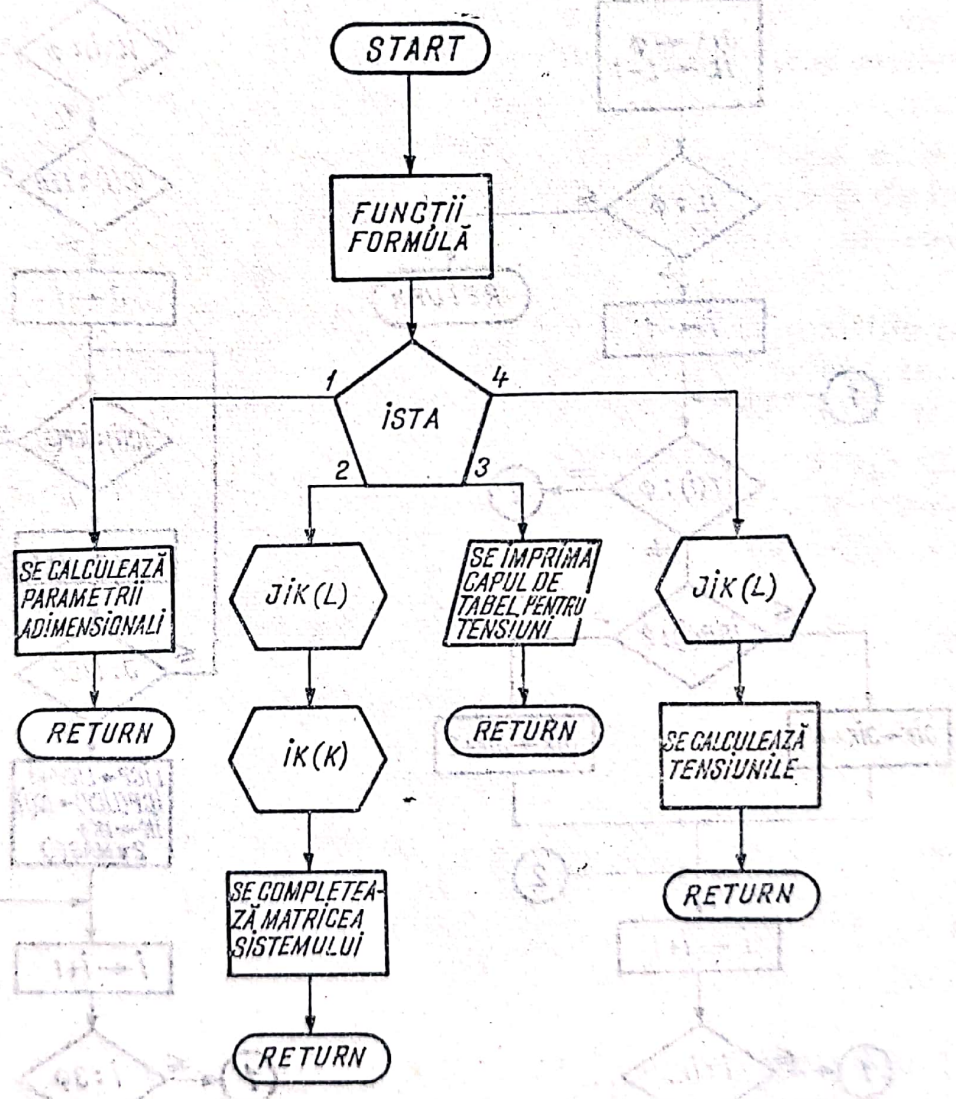


Fig. 5.22

vedea care sînt principalele operaţii de calcul pe care le execută un astfel de program.

Deoarece pentru toate tipurile de elemente a fost necesară introducerea unui număr de funcţii, care au fost definite în capitolul 2,

Scanned with OKEN Scanner

fiecare subprogram specific de elemente are un număr de instrucţiuni care definesc funcţii formulă [1], [22], aceasta fiind modalitatea cea mai avantajoasă din punctul de vedere al utilizării memoriei calculatorului şi a obţinerii unei viteze de execuţie cît mai mare.

Intrarea în subprogram este comutată de valoarea indicatorului ISTA pentru calculul parametrilor adimensionali, pentru completarea matricei sistemului de ecuaţii, pentru scrierea capului de tabel al valorilor tensiunilor sau pentru calculul acestora.

Completarea matricei sistemului de ecuaţii al constantelor de integrare se face cu valorile coeficienţilor din tabelele 3.3 — 3.19, pe coloanele şi liniile precizate de funcţiile JIK şi IK.

În urma testării rangului elementului în instrucţiunea de descriere a unei legături, se precizează valoarea coeficientului de rang δ (v. § 3.2). Se completează apoi liniile corespunzătoare conturului I al elementului (dacă are ambele capete de legătură) scriindu-se mai întîi coeficienţii obţinuţi din condiţiile de continuitate a deplasărilor radiale şi rotirilor iar apoi cei din ecuaţia de echilibru pentru momentele încovoietoare axiale şi din ecuaţia de echilibru a forţelor pe direcţie radială. În continuare, operaţia se execută pentru conturul E.

Pentru calculul tensiunilor (ISTA = 4), se apelează din nou funcţia JIK(L) pentru a identifica în tabloul necunoscutelor sistemului de ecuaţii care sînt valorile constantelor de integrare corespunzătoare elementului respectiv. Subprogramul elementului primeşte de la programul principal — prin zona comună a memoriei — valoarea abscisei pentru care trebuie să calculeze tensiunile. Tipărirea valorilor tensiunilor se face de către programul principal, în forma precizată de cartela de execuţie citită.

Rezolvarea sistemului de ecuaţii al constantelor de integrare se face de către subprogramul SIST7, care a fost elaborat pe baza unui algoritm de eliminare Gauss-Jordan [23], [47].

Deoarece pentru unele din structurile calculate s-au obţinut sisteme de ecuaţii slab condiţionate, valorile coeficienţilor avînd o împrăştiere relativ mare, soluţia determinată printr-o primă eliminare Gauss-Jordan este îmbunătăţită prin rezolvarea repetată a sistemului şi determinarea unei soluţii eroare [21]. În acest fel, rezolvarea sistemului devine iterativă, procesul considerîndu-se terminat cînd este satisfăcută una din următoarele condiţii:

— valorile necunoscutelor, obţinute prin ultima iteraţie, diferă de cele determinate prin iteraţia anterioară cu mai puţin de 0,1%;

— înlocuind în sistemul de ecuaţii originar valorile necunoscutelor determinate prin ultima iteraţie, toate ecuaţiile sînt satisfăcute cu o eroare mai mică de 10^{-6}.

Scanned with OKEN Scanner

Pe de altă parte, pentru a mări convergența procesului de calcul și a reduce numărul de iterații, se mai fac următoarele operații :

— rearanjarea liniilor astfel încît prima linie să fie cea care are cel mai mic număr de coeficienți nuli, în liniile următoare numărul acestora fiind crescător. Eficiența acestei operații este cu atît mai mare cu cît matricea sistemului este mai „goală" ;

— permutarea coloanelor astfel încît termenii diagonali ai sistemului să fie dominanți [23].

Pentru a avea un control al modului în care s-a rezolvat sistemul de ecuații, subprogramul SIST7 transmite unul din mesajele ce se prezintă în § 6.3.

5.8. **Programul principal**

Coordonarea și controlul activității tuturor subprogramelor aferente, se face de către programul principal STAXIS.

După cum se vede din organigrama prezentată în figura 5.23, a și b, programul începe prin a inițializa variabilele KR și KW, în care se memorează numerele logice ale perifericelor de intrare, respectiv ieșire. Aceste numere logice sînt specifice pentru fiecare calculator și trebuie definite în mod corespunzător la implementarea programului pe un anumit calculator. În principiu, acestea sînt singurele modificări care trebuie făcute la trecerea programului de pe un calculator pe altul.

Tot în faza de inițializare se pune pe 1 indicatorul ISP, pentru a se căuta prima comandă * STRUCTURA și se pune pe Ø indicatorul ICC, pentru a indica subprogramului de analiză a cartelelor de comandă (ACC) că el este cel care citește cartelele.

După aceste inițializări, programul principal cheamă subprogramul ACC pentru a analiza prima cartelă de comandă.

În mod normal, în continuare programul principal trece prin trei etape distincte.

Fiecare etapă constă din mai multe subetape succesive. În cadrul fiecărei etape se testează deseori indicatorul IERR, pentru a se sări peste unele subetape care devin inutile dacă pînă la momentul respectiv s-au detectat erori.

Orice eroare detectată anulează calculul tensiunilor, dar nu împiedică, în continuare, analiza instrucțiunilor scrise în limbajul STAXIS. Astfel, în principiu, după o primă execuție a programului, utilizatorul este informat asupra majorității erorilor sintactice din program. În felul acesta se micșorează timpul de punere la punct și numărul de rulări pentru un program.

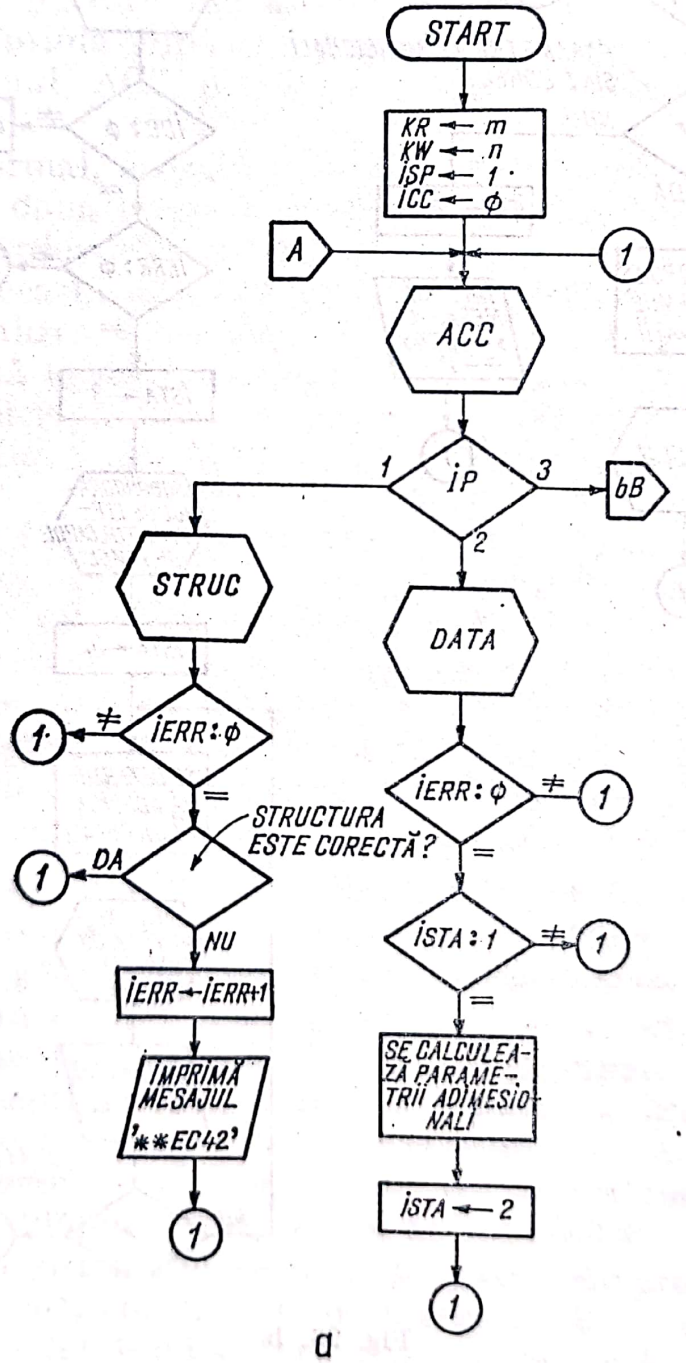
La o rulare nu este posibilă totdeauna semnalarea tuturor erorilor deoarece programul nu detectează decît o eroare pe o cartelă,

Scanned with OKEN Scanner

iar pe de altă parte, unele verificări se fac numai în faza de execuţie propriu-zisă a programului.

Prima etapă a programului este etapa de descriere „calitativă" a structurii. Ea este iniţiată de cartela de comandă * STRUCTURA.

În această etapă rolul principal îl joacă subprogramul STRUC. El analizează cartelele care descriu structura şi completează tablourile legate de configuraţia generală a structurii (v. § 5.4). Orice eroare apărută la acest nivel este semnalată şi indicatorul IERR este incrementat.



a

Fig. 5.23, a

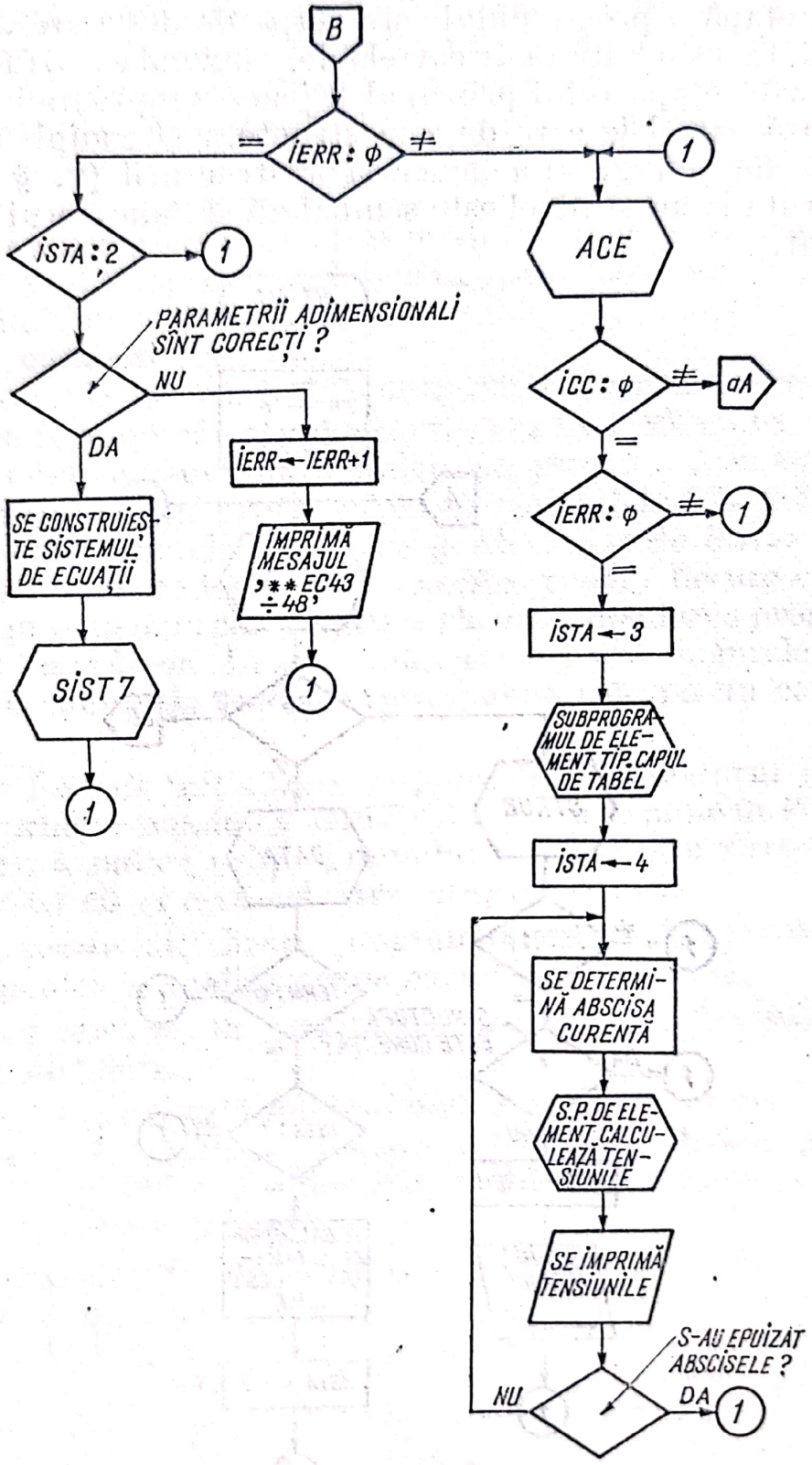

B
IERR : φ
=
≠
1
ISTA : 2
1
PARAMETRII ADIMENSIONALI SÎNT CORECȚI ?
NU
DA
IERR ← IERR+1
IMPRIMĂ MESAJUL '*** EC43 ÷ 48'
1
SE CONSTRUIEȘTE SISTEMUL DE ECUAȚII
SIST 7
1
ACE
ICC : φ
≠
aA
=
IERR : φ
≠
1
=
ISTA ← 3
SUBPROGRAMUL DE ELEMENT TIP. CAPUL DE TABEL
ISTA ← 4
SE DETERMINĂ ABSCISA CURENTĂ
S.P. DE ELEMENT CALCULEAZĂ TENSIUNILE
SE IMPRIMĂ TENSIUNILE
S-AU EPUIZAT ABSCISELE ?
NU
DA
1

Fig. 23, b

Dacă nu a apărut nici o eroare pe durata activității subprogramului STRUC, atunci programul principal verifică dacă sistemul de ecuații nu are mai mult de 20 de ecuații, verificare ce se face cu funcțiile IK și JIK.

Observație : Considerînd că structura are 15 elemente și că dintre acestea 13 se pot asambla la ambele capete, rezultă un sistem de 56 de ecuații cu 56 de necunoscute. Restricția de 20 ecuații a fost dictată de considerente de dimensiune a memoriei calculatorului IBM 1130 și ea nu este, bineînțeles, o restricție de principiu.

Cu aceasta prima etapă a programului se încheie și se apelează din nou subprogramul ACC pentru a analiza următoarea cartelă de comandă.

În mod normal, această cartelă trebuie să fie *DATE. Ea inițiază cea de a doua etapă a programului, care este etapa de definire a parametrilor elementelor structurii.

De data aceasta subprogramul DATA este cel care joacă rolul central. El analizează cartelele de parametri și completează unul dintre cele două tablouri de parametri (PA sau PM).

Dacă operația a decurs fără erori, și dacă parametrii introduși sînt metrici, atunci programul principal calculează parametrii adimensionali.

Programul principal inițiază această operație atribuind variabilelor RS și HS valorile parametrilor metrici cu rangul 5, respectiv 6 ai primului element definit al structurii.

Mai departe calculul este realizat de subprogramele de element corespunzătoare tipurilor care alcătuiesc structura. Ele sînt chemate pe rînd și completează tabloul PA folosind tabloul PM.

Cea de a treia etapă a programului este etapa de calcul a tensiunilor.

Ea este inițiată de cartela de comandă * REZOLVA.

Dacă în etapele precedente au apărut erori, atunci etapa a treia nu face decît să analizeze cartelele de afișare a rezultatelor cu ajutorul subprogramului ACE, fără a calcula, însă, tensiunile.

Dacă nu au existat erori și dacă aceasta este prima cartelă * REZOLVA, se verifică valorile unor parametri adimensionali. Dacă aceste valori se încadrează între anumite limite, se trece la construirea sistemului de ecuații al constantelor de integrare, prin apelarea succesivă a subprogramelor corespunzătoare tuturor elementelor care compun structura ce se calculează.

Rezolvarea sistemului se face de către subprogramul SIST7. Din acest moment, constantele de integrare din ecuațiile în deplasări ale elementelor fiind determinate, se pot calcula tensiunile în orice punct al structurii.

Scanned with OKEN Scanner

În acest scop încep să se citească cartelele de afişare, de către subprogramul ACE.

După citirea unei cartele, dacă nu există erori, subprogramul de element tipăreşte capul de tabel corespunzător.

Urmează calculul tensiunilor şi afişarea lor. Acest proces are loc într-un ciclu controlat de programul principal.

În această etapă se folosesc următoarele elemente din zona comună a memoriei (v. § 5.6):

— NABS: numărul absciselor;

— TABS(20): tabloul cu valorile absciselor;

— VABS: variabilă căreia programul principal îi atribuie valoarea curentă a abscisei în care subprogramul de element calculează tensiunile;

— VEF(4): tablou în care subprogramul de element depune valorile celor patru tensiuni calculate în punctul de abscisă VABS;

— VEFM(4): tablou în care programul principal memorează valorile maxime ale tensiunilor;

— VABM(4): tablou în care programul principal memorează abscisele corespunzătoare celor patru tensiuni maxime.

Programul principal atribuie variabilei VABS valoarea abscisei iar subprogramul de element depune în VEF (4) valorile celor patru tensiuni. În funcţie de modul de redactare, programul principal tipăreşte toate tensiunile sau numai pe cele maxime.

Observaţie. În organigrama simplificată din figura 5.23, b este reprezentată situaţia în care se afişează toate tensiunile.

Procesul continuă pînă la epuizarea tuturor absciselor.

În cazul în care modul de afişare este grafic, este necesar să se cunoască valorile extreme ale tensiunii care trebuie reprezentată. De aceea, se efectuează de două ori calculul: prima dată se determină valorile extreme, iar a doua oară se trasează graficul.

O altă soluţie ar fi fost memorarea într-un tablou a valorilor, determinarea extremelor şi trasarea graficului.

Deşi această soluţie este mai rapidă, (necesită calculul tensiunilor o singură dată) ea are inconvenientul că cere un tablou în care să se memoreze valorile tensiunilor. Dacă numărul absciselor este mare, acest tablou ocupă un spaţiu mare în memorie; de aceea s-a preferat prima metodă.

Trasarea graficului se execută cu programul DESEN. În afară de graficul propriu-zis el trasează şi liniile care corespund valorilor extreme şi linia de zero, dacă ea este cuprinsă între aceste valori. De asemenea haşurează spaţiul dintre curba trasată şi linia de zero.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul VI

Utilizarea programului

6.1. Tipuri de probleme ce pot fi rezolvate cu programul STAXIS

Programul STAXIS permite, în primul rînd, determinarea tensiunilor și verificarea oricărei structuri axial simetrice care se încadrează în ansamblul ipotezelor care au delimitat rezolvarea problemei abordate. Aceste ipoteze s-au prezentat în capitolul 1 și s-au aplicat în cadrul celorlalte capitole ale lucrării. Ele se referă în special la geometria structurii și la sarcinile aplicate acesteia.

La proiectarea unei structuri se pot calcula un număr oarecare de variante, considerînd variabili unul sau mai mulți parametri ai structurii urmînd a se alege apoi varianta care satisface cel mai bine condițiile constructive, tehnologice, economice etc. În acest mod programul poate deveni un auxiliar prețios al proiectantului, în condițiile obținerii unor efecte tehnico-economice apreciabile. De exemplu, pentru recipientul din figura 6.1 s-a considerat variabilă raza R a piesei de rezemare, calculul tensiunilor efectuîndu-se pentru diverse valori ale acesteia. Rezultatele obținute se prezintă în capitolul 7 al lucrării.

Scanned with OKEN Scanner

Programul poate fi utilizat şi pentru calculul unor categorii de structuri axial nesimetrice, dar care pot fi reduse la studiul unui număr oarecare de probleme axial-simetrice, rezultate prin secţionare cu o

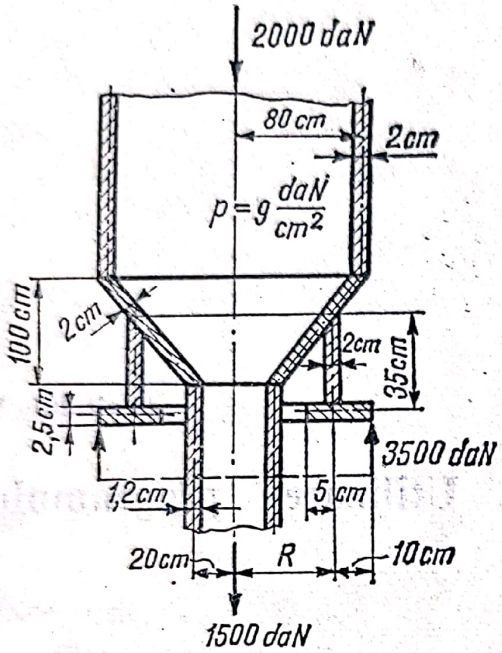


Fig. 6.1

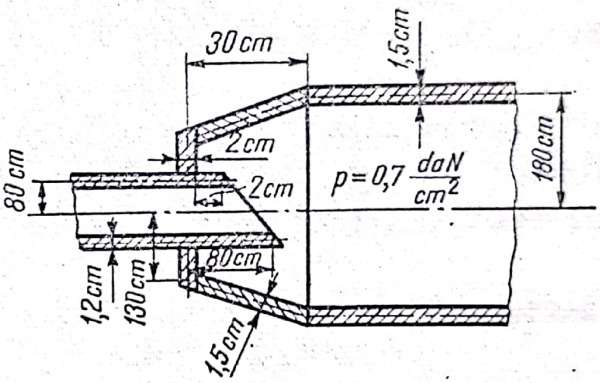


Fig. 6.2

reţea de plane longitudinale. De exemplu, tancul din figura 6.2 are racordul de evacuare din stînga cu o secţiune de capăt oblică. Pentru calcul se consideră succesiv că lungimea racordului este variabilă, corespunzătoare intersecţiei cu un plan longitudinal, care are un unghi bine precizat faţă de o direcţie de referinţă. Ansamblul structurilor axial simetrice obţinute astfel va oferi o imagine a stării de tensiune a structurii date.

În figura 6.3 se dă un alt exemplu de structură axial nesimetrică şi anume un buncăr format din doi cilindri legaţi cu un con oblic. Dacă excentricitatea e dintre axele celor doi cilindri este mai mică decît raza r a cilindrului mic, se poate secţiona structura cu o stea de plane ce trec prin axa cilindrului mare obţinîndu-se astfel un şir de structuri axial simetrice pentru care raza cilindrului mic are valori diferite, funcţie de direcţia planului de secţionare. În capitolul 7 al lucrării se prezintă rezultatele calculelor pentru structurile din figurile 6.2 şi 6.3.

Unele structuri sînt în ansamblu axial simetrice dar au unele racorduri, rezemări, orificii etc. care produc perturbaţii locale ale stării axial simetrice de solicitare. În astfel de cazuri calculul efectuat

Scanned with OKEN Scanner

pentru structura axial simetrică va da informații corecte asupra stării de tensiune numai în zone suficient de depărtate de „perturbațiile" nesimetrice ; pentru fiecare din acestea se fac calcule separate pentru determinarea tensiunilor locale.

În forma prezentată, programul STAXIS reprezintă o variantă de bază. El poate fi folosit ca atare sau poate servi ca punct de plecare pentru elaborarea unor alte programe, mai vaste sau mai simple.

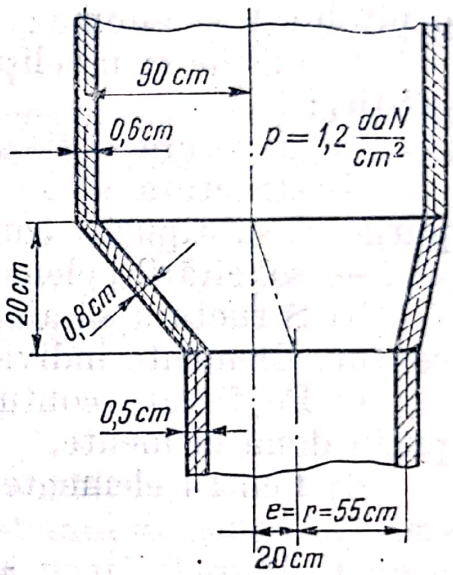


Fig. 6.3

Programul poate fi dezvoltat și extins în următoarele direcții :

— introducerea și a altor tipuri de elemente : tor, elipsoid, paraboloid etc. ;

— introducerea și a altor subtipuri de elemente : cilindru scurt încastrat la un capăt, con scurt, placă inelară încastrată pe una din cele două circumferințe etc. ;

— completarea programului cu instrucțiunile necesare pentru calculul deplasărilor radiale și (sau) axiale ale structurii ;

— completarea programului cu subprogramele necesare pentru a calcula efecte locale nesimetrice de diverse tipuri : orificii, racorduri, piese de rezemare etc.

Pornind de la relațiile de calcul și de la programul prezentate în lucrare pot fi elaborate programe simplificate și anume :

— programe pentru structuri formate dintr-o gamă mai restrînsă de tipuri și subtipuri de elemente ;

— elementele structurii au o gamă mai restrînsă de sarcini ;

— program fără limbaj specializat de analiză a datelor.

În lucrările [16], [17], [18] se prezintă — de exemplu — programe simple, fără limbaje orientate, pentru calculul unor structuri de forme particulare, formate din plăci plane și învelișuri cilindrice.

6.2. Limitări și restricții la utilizarea programului

Orice program de calcul fiind elaborat în anumite condiții concrete, cu o destinație precisă, mai generală sau mai restrînsă, duce implicit la generarea unor limitări și restricții privind folosirea sa. Aceste restricții pot fi proprii algoritmului, programului sau calcu-

latorului. Se enumeră în continuare principalele restricţii şi limitări ale programului STAXIS.

6.2.1. *Restricţii proprii algoritmului*

a) Structura ce se calculează să satisfacă ipotezele enunţate în capitolul 1 şi anume :

— plăcile şi învelişurile în care se descompune structura să fie subţiri ;

— structura să fie axial simetrică şi static determinată axial ;

— structura să se descompună convenabil în elemente de tipurile şi subtipurile considerate ;

— solicitările elementelor să fie cele considerate.

b) Structura să aibă cel puţin două elemente, asamblate pe un contur. Elemente individuale nu se pot calcula.

c) Pe fiecare contur de legătură trebuie să se asambleze cel puţin două elemente.

d) Pentru elemente de tip CON trebuie ca (v. (2. 138''))

$$\nu_{min} = \sqrt{4\sqrt{3(1-\mu^2)}\cdot\frac{\sin\varphi}{\cos^2\varphi}\cdot\frac{r}{h}} \geqslant 5$$

e) Pentru elementele structurii trebuie ca valoarea coeficientului de contracţie transversală să fie strict pozitivă şi mai mică decît 0,5.

6.2.2. *Restricţii proprii limbajului şi programului*

a) Instrucţiunile să fie scrise cu respectarea sintaxei specifice.

b) Succesiunea instrucţiunilor să fie cea impusă de logica etapei de calcul şi de tipul informaţiei ce se transmite calculatorului.

c) Să nu existe elemente sau legături definite de mai multe ori.

d) Instrucţiunile prin care se definesc legăturile să se scrie astfel încît :

— să nu existe elemente pentru care nu s-au specificat legăturile sau pentru care s-au specificat mai multe legături decît cele corecte ;

— elementele cu o singură margine „activă" să fie specificate într-o singură legătură, iar cele cu două margini „active" în două legături diferite (una pentru marginea I şi una pentru marginea E).

e) Dacă în prima variantă de calcul a unei structuri datele au fost adimensionale, ele nu pot fi modificate în variantele ulterioare ca date metrice.

Scanned with OKEN Scanner

f) Pentru toate elementele structurii trebuie definiţi toţi parametrii geometrici şi elastici (μ şi E). Coeficientul de dilatare termică liniară (α) nu este necesar decît în cazul existenţei unor solicitări termice; de asemenea, greutatea specifică a materialului (γ) nu trebuie definită decît dacă structura se află în mişcare de rotaţie.

g) Pentru o structură aflată în mişcare de rotaţie trebuie definită viteza unghiulară — metrică sau adimensională — pentru toate elementele.

h) În instrucţiunile pentru calculul tensiunilor, abscisele nu pot fi metrice, dacă datele au fost introduse ca mărimi adimensionale.

i) Valorile absciselor secţiunilor în care se calculează tensiunile trebuie să fie pozitive şi să nu depăşească limitele corespunzătoare extremităţilor elementului la care se face referirea.

6.2.3. *Restricţii proprii calculatorului*

a) Structura să aibă maximum 15 elemente.

b) Structura să fie astfel definită încît sistemul de ecuaţii al constantelor de integrare să fie determinat şi să poată fi rezolvat cu o precizie impusă, după un număr stabilit de iteraţii. În general nu se va ajunge la astfel de situaţii decît dacă s-au încălcat unele din ipotezele enunţate şi anume:

— se definesc ca elemente scurte unele elemente lungi;

— unele elemente sînt cu perete gros;

— unele elemente sînt cu perete foarte subţire, astfel încît ele ar trebui calculate în teoria de membrană.

c) În decursul oricărei etape de calcul să nu se depăşească limitele de reprezentare a unui număr real sau întreg.

d) Să nu se scrie instrucţiuni pe mai mult de 9 cartele de continuare.

e) Pentru calculul tensiunilor unui element, numărul de paşi ai abscisei nu poate fi peste 500.

f) Calculatorul să aibă compilator FORTRAN şi o memorie suficient de mare pentru a cuprinde programul în configuraţia dorită. La nevoie se va utiliza segmentarea.

6.3. Mesaje de eroare

Ca urmare a preocupării de a reduce cît mai mult posibilitatea obţinerii de rezultate cu programul STAXIS în condiţiile unor date introduse incorect sau ale efectuării unor operaţii logice sau de

Scanned with OKEN Scanner

calcul susceptibile a fi afectate de erori, s-au prevăzut în program un mare număr de verificări la toate nivelele şi în toate etapele de prelucrare a informaţiilor. Principalele verificări privesc respectarea ipotezelor, restricţiilor şi limitărilor prezentate mai sus. În afara acestora însă s-au considerat necesare sau utile şi altele.

Dacă în urma efectuării unei verificări se constată o abatere de la condiţiile impuse, se scrie un mesaj, de tipul precizat la § 4.3, prin care se transmite codul erorii. Codurile sînt prezentate în tabelul 6.1, ceea ce permite identificarea cu uşurinţă a cauzei care a generat eroarea şi deci înlăturarea ei. Existenţa a cel puţin o eroare pentru o structură dată, duce la suspendarea execuţiei calculelor pentru structura respectivă.

Tabelul 6.1

Codurile mesajelor de eroare

Codul	Eroarea
01	Instrucţiune de comandă eronată
02	Comandă necunoscută
03	Simbol eronat de definire a tipului datelor într-o instrucţiune * DATE
04	Structura nu a fost definită
05	Instrucţiune ELEMENTE eronată
06	Instrucţiune de comandă (cu *) întîlnită anormal
07	Lipseşte instrucţiunea ELEMENTE
08	Eroare sintactică în instrucţiune de definire a unui element
09	Identificatorul unui element este zero sau mai mare ca 15
10	S-a definit doar un element sau nici unul
11	Elementul a mai fost specificat
12	Eroare de tip pentru un element
13	Eroare de subtip pentru un element
14	Eroare sintactică într-o instrucţiune de definire a legăturilor
15	Identificatorul unei legături este zero sau mai mare ca 99
16	Legătura a mai fost specificată
17	Elementul este nedefinit sau definit incorect
18	Elementul a mai fost specificat în aceeaşi legătură
19	Elementul a mai fost specificat — în altă legătură — cu acelaşi mod de asamblare
20	Element cu varietate eronată
21	Elementului i s-a specificat varietatea fără să fie cazul
22	Într-o legătură este specificat un singur element
23	Nici o legătură specificată
24	Elemente fără legături (urmează numerele lor)
25	Eroare la scrierea unui număr în virgulă mobilă
26	Lipseşte mantisa unui număr real
27	Eroare sintactică în instrucţiune de definire a datelor
28	Simbol eronat în instrucţiune de definire a datelor
29	Identificatorul unui parametru este zero sau mai mare ca 22

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 6.1 (continuare)

Codul	Eroarea
30	Parametru ce a mai fost definit
31	S-au folosit mai mult de 9 cartele pentru continuarea unei instrucțiuni
32	Nu s-a citit nici o instrucțiune de definire a datelor
33	Elemente fără date (urmează numerele lor)
34	Eroare sintactică într-o instrucțiune de execuție
35	Mod de redactare eronat (într-o instrucțiune de execuție)
36	Mod de definire a absciselor eronat (într-o instrucțiune de execuție)
37	Nu se definesc abscisele (într-o instrucțiune de execuție)
38	Valoare negativă în instrucțiune de execuție
39	Într-o cartelă de execuție numărul de pași este zero sau depășește 500
40	Instrucțiunea de execuție indică definirea absciselor prin pași, dar nu se definesc toate valorile necesare
41	Instrucțiune de modificare a datelor cu parametri metrici, dar parametrii inițiali erau adimensionali
42	Matricea coeficienților sistemului de ecuații al constantelor de integrare nu este pătrată sau una din dimensiuni este mai mare de 20
43	Coeficientul de contracție transversală nu se află între limitele 0,2 la 0,48
44	Modulul de elasticitate este nul sau negativ
45	Raza elementului este nulă sau negativă
46	Raza adimensională (pentru elemente de tip CIS, CIL, PLI și PLA) sau grosimea adimensională (pentru elemente de tip CON, SFC și SFE) este nulă sau negativă
47	Grosimea adimensională (pentru elemente de tip CIS, CIL, PLI și PLA) sau unghiul φ (φ pentru CON, φ_m pentru SFC și φ_1 pentru SFE) este nul sau negativ
48	Nu este definită viteza unghiulară pentru toate elementele unei structuri aflată în mișcare de rotație
49	Lungimea unui element de tip CIS este nulă sau negativă
50	Pentru un element de tip PLI raza circumferinței exterioare este mai mică sau egală cu raza circumferinței interioare
51	Pentru un element de tip CON raza circumferinței mari este mai mică sau egală cu raza circumferinței mici
52	Raza adimensională a unui element de tip CON este nulă sau negativă
53	Pentru un element de tip CON parametrul $\nu_1 < 5$
54	Raza adimensională este nulă sau negativă pentru un element de tip SFC
55	Raza adimensională este nulă sau negativă pentru un element de tip SFE
56	Pentru un element de tip SFE unghiul φ_2 este mai mic decît unghiul φ_1
57	Sistemul de ecuații al constantelor de integrare este nedeterminat
58	La rezolvarea sistemului de ecuații al constantelor de integrare se depășește valoarea 10^{38}
59	La rezolvarea sistemului de ecuații al constantelor de integrare se depășește valoarea 10^{-39}
60	În instrucțiune de execuție abscisele sînt metrice datele fiind adimensionale

Scanned with OKEN Scanner

După ultima instrucţiune ce se referă la o anumită structură se afişează mesajul

** IN ACEST PROGRAM SINT n ERORI

în care n reprezintă numărul erorilor găsite pentru structura respectivă.

Din dorinţa de a obţine unele informaţii asupra modului în care s-au efectuat calculele, sau pentru a semnala unele erori „minore", care nu afectează rezultatele calculelor, programul mai afişează şi unele mesaje de „atenţionare", sub forma

**ATMM

în care MM este un număr care indică, în lista din tabelul 6.2, tipul mesajului. În acest mod se transmit informaţii asupra condiţiilor în care s-a rezolvat sistemul de ecuaţii al constantelor de integrare sau se atrage atenţia că nu se pot calcula tensiunile petru un element dat al structurii, deoarece valorile absciselor în care ar trebui făcute calculele sînt incorecte — de exemplu nu se află între limitele elementului respectiv.

Tabelul 6.2

Codurile mesajelor de atenţionare

Codul	Mesajul de atenţionare
01	Sistemul de ecuaţii al constantelor de integrare s-a rezolvat prin N iteraţii (se afişează N)
02	Sistemul de ecuaţii al constantelor de integrare nu s-a rezolvat cu precizia impusă după 33 iteraţii
03	Abscisă negativă pentru un element de tip CIL
04	Abscisă negativă sau mai mare ca lungimea, pentru un element de tip CIS
05	Abscisa nu se află între limitele unui element de tip PLI
06	Abscisa este negativă sau mai mare ca raza unui element de tip PLA
07	Abscisa este negativă sau mai mare ca φ_m pentru un element de tip SFC
08	Abscisa este negativă sau în afara limitelor unui element de tip CON
09	Abscisa este negativă sau în afara limitelor unui element de tip SFE

Pentru o ilustrare a modului în care se afişează mesajele de eroare, se prezintă în figura 6.4 o listă de instrucţiuni, dintre care unele sînt greşite. Se constată că erorile se localizează şi se identifică cu uşurinţă, ceea ce permite înlăturarea lor fără dificultăţi.

Se menţionează că unele verificări se fac în faza de execuţie a calculelor propriu-zise, adică după o comandă *REZOLVA. Aceasta

Scanned with OKEN Scanner

```
* STRUCTURA NR. 111 EXEMPLE DE ERORI
  ELEMENTE
1 CIS 01
2 CIL 1X
3 PLI 11
4 CIL X1
5 CIS 02
          I
               **EC13
6 CON 12X
          I
               **EC13
7 SFA X11
    I
               **EC12
  LEGATURI
1 1,3,2
     I
               **EC20
2 3I,4I
       I
               **EC21
1 3E
               **EC22
1 3E,2
2 3I,4,2
        I
               **EC19
               **EC24      1    3I   4
* REZOLVA
               **EC04
* DATE ADIM
CONSTANTE 1=0.3,3=2.1,4=1.
1 5=21.65151,7=1.,8,1.,9=3.235
                        I
               **EC27
2 7=1.,8=1.,10=5.155,33=1.
                          I
               **EC29
4 5=20.82,7=0.2428275,8=0.252525,10=4.957,10=1.
                                            I
               **EC30
* REZOLVA
1 T,A,PASI 0.,33,0.1
1 T,M,PASI 0.,33,0.1
    I
               **EC60
1 T,A,ABSC 0,0.1,0.2,0.3,0.4.0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.
2 T,A,PASI 0.,33
               **EC40
* DATE METRIC
               **EC41
2 5=10.7175
* REZOLVA
3 T,A,PASI -1,32,0.1
             I
               **EC38
4 T,A,PASI 0.,51,0.1

               **IN ACEST PROGRAM SINT 16 ERORI
```

Fig. 6.4

Scanned with OKEN Scanner

înseamnă că mesajele de eroare corespunzătoare nu se scriu dacă execuţia se suspendă ca urmare a unor erori detectate anterior comenzii * REZOLVA. Este cazul mesajelor avînd codurile 43—59.

6.4. Precizia rezultatelor ce se obţin cu programul STAXIS

Precizia cu care se determină tensiunile în structurile ce se calculează cu programul STAXIS este determinată de precizia „primitivelor", adică a relaţiilor analitice ce s-au programat, de tipurile algoritmilor folosiţi pentru diverse operaţii de clculul şi de precizia calculatorului, respectiv de numărul cifrelor semnificative cu care acesta operează.

Aşa cum s-a arătat în capitolele 2 şi 3, integrarea ecuaţiilor diferenţiale în deplasări s-a făcut exact, sub formă finită, pentru plăci plane circulare şi inelare şi pentru învelişuri cilindrice scurte şi lungi. Pentru învelişurile sferice şi conice soluţiile ecuaţiilor diferenţiale respective sînt determinate sub formă de serii ce asigură o precizie satisfăcătoare pentru calcule tehnice [40].

În lucrarea [30] se face o analiză a preciziei şi dificultăţilor de calcul pentru structurile axial simetrice şi se ajunge la concluzia că pentru structuri foarte subţiri sau foarte lungi pot apare împrăştieri mari ale valorilor constantelor de integrare sau ale altor termeni ce intervin în calcule, ceea ce afectează într-o măsură mai mică sau mai mare precizia rezultatelor.

Algoritmul folosit pentru descrierea structurii nu implică introducerea de aproximaţii suplimentare faţă de cele decurgînd din acceptarea ipotezelor specifice calculului plăcilor şi învelişurilor subţiri.

Pentru rezolvarea sistemului de ecuaţii al constantelor de integrare s-a utilizat un algoritm iterativ, care asigură un control al preciziei cu care se determină soluţia sistemului.

Testările programului pe calculatoarele IBM 1130 şi Felix C 256 de la Centrul de calcul al Institutului politehnic Bucureşti, au arătat că, în general, utilizarea preciziei simple (7 cifre semnificative) este satisfăcătoare, dar se pot ivi situaţii în care este necesară utilizarea preciziei duble. Evident că în acest caz calculatorul pe care se rulează programul trebuie să aibă o configuraţie care să permită acest lucru.

Scanned with OKEN Scanner

6.5. Verificări ale programului

În procesul de elaborare a programului s-au făcut numeroase testări și verificări ale diverselor secvențe de calcul, ale subprogramelor și ale programului în ansamblu. S-au calculat structuri ale căror stări de tensiune au fost publicate în lucrările [14] și [40].

Pentru structura din figura 6.5 autorii au făcut verificări experimentale [15], care se prezintă în continuare.

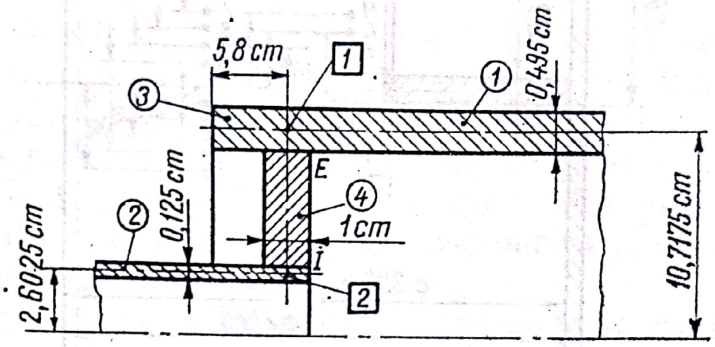


Fig. 6.5

Modelul pe care s-au făcut determinările, avînd forma și dimensiunile din figura 6.6, a fost confecționat din oțel și solicitat cu presiune interioară. Toate elementele modelului au fost prelucrate prin strunjire înainte de asamblare. Pentru a nu se produce o modificare a distribuției tensiunilor în zonele cordoanelor de sudură, fundul plan a fost teșit atît la exterior cît și la interior, astfel încît după asamblare, modelul se apropia foarte mult de forma teoretică, considerată în calcule (v. fig. 6.5).

Presiunea în interiorul modelului a fost realizată cu o pompă manuală și măsurată cu un manometru 0—10 daN/cm², clasă 2,5.

Măsurarea deformațiilor specifice ale modelului s-a făcut prin tensometrie electrică rezistivă [45].

S-au folosit traductoare tensometrice cu baza de 3 mm, tip 3/120 LP21, fabricație HBM, cu suport de bachelită, rezistența electrică 121,2 și 121,6 Ω ± 0,25% și constanta 2,01 ± 0,5 %. Lipirea traductoarelor s-a făcut cu adezivul cu polimerizare rapidă X 60.

Puntea tensometrică a fost de tipul Rz—007, tranzistorizată, iar cutiile de comutare tip Rz — 004, cu 12 posturi, fabricație Orion — EMG.

Traductoarele s-au conectat la cutiile de comutare prin cablu TY 08.

Punctele în care s-au lipit traductoarele s-au aflat pe suprafeţele exterioare ale modelului. Ele s-au notat cu litere A, B, . . . , R, S pe figura 6.6, poziţiile lor fiind determinate prin cote măsurate de la originile sistemelor de axe pentru fiecare element al modelului.

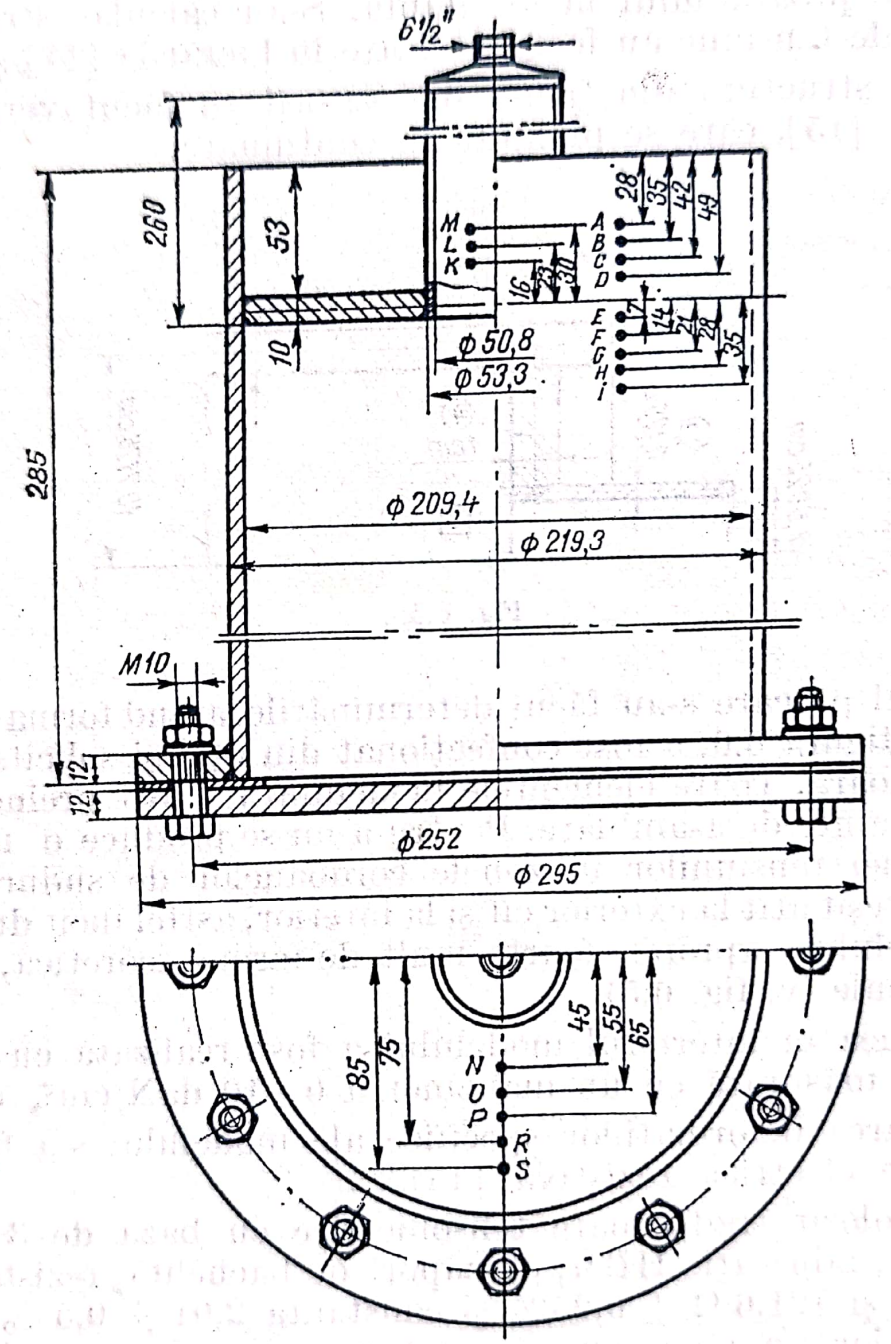


Fig. 6.6

Avînd în vedere simetria axială a problemei, în fiecare din cele 17 puncte de măsurare s-au montat cîte două traductoare, după direcţiile principale cunoscute. Fiecărui traductor i s-a atribuit un număr — impar celor longitudinale, par celor circumferenţiale.

Scanned with OKEN Scanner

Citirea deformaţiilor specifice s-a făcut pentru cinci valori ale presiunii interioare, presiunea maximă realizată producînd în model tensiuni sub limita de curgere a materialului.

S-au realizat trei cicluri de încărcare-descărcare :

— un ciclu de forma

$$0-3-0-5-0-7-0-8-0-9-0, \quad (\text{daN/cm}^2)$$

— două cicluri de forma

$$0-3-5-7-8-9-0 \qquad (\text{daN/cm}^2).$$

Diferenţele dintre valorile deformaţiilor specifice citite la aceeaşi presiune dar în cicluri diferite, nu au depăşit limitele corespunzătoare erorii punţii tensometrice.

În urma măsurărilor s-au determinat pentru fiecare traductor tensometric, la fiecare valoare a presiunii, cîte şase valori ale deformaţiilor specifice. S-a făcut media aritmetică a acestor valori şi s-a obţinut deformaţia specifică medie ε_m.

Deoarece solicitarea modelului a rămas în stadiul elastic, se poate admite că dependenţa dintre deformaţiile specifice şi presiune este liniară, adică de forma

$$\varepsilon = kp, \tag{6.1}$$

în care k este deformaţia specifică în punctul şi pe direcţia pe care a fost aplicat traductorul considerat, corespunzătoare solicitării modelului cu o presiune egală cu unitatea. Pentru fiecare traductor s-au determinat — pentru trasarea dreptei (6.1) — cinci puncte de coordonate ε_{m_i}, p_i.

Valorile lui k s-au calculat folosind metoda celor mai mici pătrate, adică cu relaţia

$$k = \sum_{i=1}^{5} p_i \varepsilon_{m_i} \Big/ \sum_{i=1}^{5} p_i^2 \tag{6.2}$$

şi s-au înscris în coloana 6 din tabelul 6.3.

Cu relaţiile date de legea lui Hooke pentru starea plană de tensiune şi avînd în vedere relaţia (3.5''), tensiunile adimensionale principale măsurate într-un punct sînt

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_1 &= \frac{1}{1-\mu^2}(k_1 + \mu k_2) \\ \bar{\sigma}_2 &= \frac{1}{1-\mu^2}(k_2 + \mu k_1), \end{aligned} \tag{6.3}$$

Scanned with OKEN Scanner

în care indicii 1 și 2 se referă la direcția longitudinală, respectiv circumferențială. Pentru coeficientul de contracție transversală s-a considerat $\mu = 0{,}3$. Valorile $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$ s-au trecut la coloanele 7 și 8 din tabelul 6.3.

Pentru structura din figura 6.5, care reprezintă schema de calcul a modelului experimental (lungimea mantalei modelului fiind mare, flanșa inferioară nu influențează starea de tensiune din zona în care s-au făcut măsurările) s-au calculat tensiunile cu programul STAXIS. Datele introduse sînt metrice : lungimile s-au introdus în cm și forțele în daN. Pentru a obține din calcul valori ale tensiunilor adimensionale care să fie comparabile cu cele măsurate, s-au introdus ca date presiunea $p = 1$ daN/cm^2 și modulul de elasticitate $E = 2{,}1$ daN/cm^2 (nu valoarea reală $2{,}1 \cdot 10^6$ daN/cm^2).

Avînd în vedere că tensiunea adimensională este

$$\bar{\sigma} = \sigma / E$$

definită prin relația (3.5″), înseamnă că valorile reale σ se obțin înmulțind $\bar{\sigma}$ cu modulul de elasticitate E.

În figura 6.7 se prezintă lista completă a instrucțiunilor și valorile calculate ale tensiunilor adimensionale din punctele în care s-au făcut determinările experimentale. Valorile de pe suprafețele exterioare s-au trecut în coloanele 9 și 10 ale tabelului 6.3.

Pentru a formula o apreciere cantitativă asupra concordanței dintre rezultatele experimentale și cele teoretice se dau în coloana 11 a tabelului 6.3 valorile coeficientului de corelație r_1, r_2 dintre tensiunile adimensionale principale măsurate și calculate.

Dacă se notează cu X_i tensiunile adimensionale măsurate și cu Y_i cele calculate, pentru n perechi de valori X_i, Y_i, coeficientul de corelație are expresia [45]

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^{n} X_i Y_i - \sum_{i=1}^{n} X_i \cdot \sum_{i=1}^{n} Y_i}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^{n} X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} X_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^{n} Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} Y_i \right)^2 \right]}}, \qquad (6.4)$$

cu care s-au determinat valorile din tabelul 6.3.

Relația (6.4) s-a aplicat separat pentru fiecare element al modelului și pentru fiecare direcție principală a stării de tensiune.

Analizînd mărimea coeficienților de corelație rezultă o bună concordanță dintre tensiunile calculate și cele măsurate. Valorile

Scanned with OKEN Scanner

```
* STRUCTURA NR. 112
  ELEMENTE
1 CIL 1X
2 CIL'X1
3 CIS 01
4 PLI 11
  LEGATURI
1 4E,3,1
2 2,4I
* DATE METRIC
CONSTANTE 1=0.3,3=2.1
1 5=10.7175,6=0.495,10=1.,13=1.
2 5=2.6025,6=0.125,10=1.,13=1.
3 5=10.7175,6=0.495,7=5.8
4 5=10.7175,6=1.,7=2.6025,10=1.,11=21.267
* REZOLVA

          **ATO1= 3


 1 T,M,ABSC 0.7,1.4,2.1,2.8,3.5

   CSI              SXI              SXE              SFI              SFE
0.7000000E 00   0.4814756E 02   -0.3783731E 02   0.7402182E 01   -0.1839327E 02
0.1400000E 01   0.2465884E 02   -0.1434860E 02   0.1718982E 00   -0.1153033E 02
0.2100000E 01   0.9877435E 01    0.4328108E 00  -0.1044338E 01   -0.3877725E 01
0.2800000E 01   0.2135074E 01    0.8175172E 01   0.7438964E 00    0.2555925E 01
0.3500000E 01  -0.7857257E 00    0.1109597E 02   0.3538284E 01    0.7102792E 01


 2 T,M,ABSC 1.6,2.3,3.0

   CSI              SXI              SXE              SFI              SFE
0.1600000E 01   0.7320628E 01    0.2593660E 01   0.1020419E 02    0.8786109E 01
0.2300000E 01   0.4796712E 01    0.5117575E 01   0.9597976E 01    0.9694234E 01
0.3000000E 01   0.4856831E 01    0.5057456E 01   0.9902811E 01    0.9962997E 01


 3 T,M,ABSC 2.8,3.5,4.2,4.9

   CSI              SXI              SXE              SFI              SFE
0.2800000E 01  -0.2536247E 00   -0.2536247E 00   0.6526784E 01    0.6374609E 01
0.3500000E 01  -0.5073248E 01    0.5073248E 01   0.7646037E 01    0.1068998E 02
0.4200000E 01  -0.1544011E 02    0.1544011E 02   0.6329525E 01    0.1559359E 02
0.4900000E 01  -0.3176023E 02    0.3176023E 02   0.5471344E 00    0.1960326E 02


 4 T,M,ABSC 4.5,5.5,6.5,7.5,8.5.

   ITA              SRI              SRE              STI              STE
0.4500000E 01   0.1470913E 02   -0.1351128E 02   0.4066525E 02   -0.3916516E 02
0.5500000E 01   0.1227073E 02   -0.1102292E 02   0.3381933E 02   -0.3236920E 02
0.6500000E 01   0.7186288E 01   -0.5909748E 01   0.2776200E 02   -0.2634060E 02
0.7500000E 01   0.1830612E 00    0.1111506E 01   0.2176614E 02   -0.2036277E 02
0.8500000E 01  -0.8412166E 01    0.9718782E 01   0.1550505E 02   -0.1411373E 02
```

Fig. 6.7

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 6.3

Tensiunile adimensionale măsurate şi calculate pentru modelul din figura 6.6

Elementul	Punctul de măsurare	Traductorul nr.	Abscise		k	Tensiuni adimensionale măsurate		Tensiuni adimensionale calculate		Coeficientul de corelaţie r
			Metrice mm	Adimensionale		$\bar{\sigma}_1$	$\bar{\sigma}_2$	$\bar{\sigma}_1$	$\bar{\sigma}_2$	
Mantaua cilindrică în consolă (3)	A	1 2	28	1,56	−1,11442 6,95175	1,06714	7,27190	−0,25362	6,37461	r_1 =0,9991
	B	3 4	35	1,95	3,87416 7,81763	6,83454	9,86798	5,07325	10,68998	
	C	5 6	42	2,34	12,68969 10,06552	17,26301	15,24441	15,44011	15,15936	r_2 = 0,9906
	D	7 8	49	2,73	25,67978 8,72767	31,09679	18,05670	31,76023	19,60326	
Mantaua cilindrică mare (1)	E	9 10	7	0,39	−30,38719 −7,97478	−36,02156	−18,78124	−37,83731	−18,39327	r_1 = 0,9979
	F	11 12	14	0,78	−12,49254 −8,39153	−16,49449	−13,33987	−14,34860	−11,53033	
	G	13 14	21	1,17	1,27495 −4,51750	−0,08824	−4,54397	0,43281	−3,87772	r_2 = 0,9984
	H	15 16	28	1,56	7,01710 0,0	7,71109	2,31332	8,17517	2,55592	
	I	17 18	35	1,95	8,88881 3,57456	10,94634	6,85846	11,09597	7,10279	

Scanned with OKEN Scanner

Mantaua cilindrică mică (2)	K	19 20	16	3,60	−0,24111 6,96786	2,03214	7,57750	2,59366	8,78610	
	L	21 22	23	5,17	3,06973 10,47482	6,82656	12,52278	5,11757	9,69423	$r_1 = 0,9745$ $r_2 = 0,8534$
	M	23 24	30	6,75	2,33472 9,21368	5,60749	10,89592	5,05746	9,96300	
Fundul planul inelar (4)	N	25 26	45	1,73	11,98052 23,10618	20,78282	29,34102	14,70913	40,66525	
	O	27 28	55	2,11	7,63109 21,09622	15,34060	25,69839	12,27073	33,81933	$r_1 = 0,9961$
	P	29 30	65	2,50	2,17824 18,67631	8,55069	21,24151	7,18629	27,76200	
	R	31 32	75	2,88	−4,98500 15,95706	−0,21746	15,89182	0,18306	21,76614	$r_2 = 0,9921$
	S	33 34	85	3,26	−12,86223 12,51206	−10,00947	9,50923	−8,41217	15,50505	

Scanned with OKEN Scanner

lui r sînt cuprinse între 0,9991, pentru direcţia longitudinală a mantalei cilindrice în consolă (elementul 3) şi 0,8534 pentru direcţia circumferenţială a mantalei cilindrice mici (elementul 2). În cazul unei concordanţe perfecte dintre tensiunile adimensionale măsurate şi calculate coeficienţii de corelaţie ar fi avut valoarea 1.

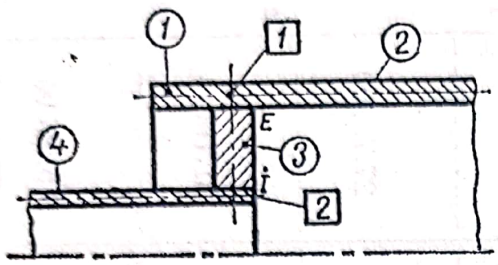


Fig. 6.8

Pentru a ilustra un alt gen de verificări ale programului se reprezintă în figura 6.8 structura din figura 6.5 pentru care însă elementele s-au numerotat în alt mod. În consecinţă şi instrucţiunile de descriere a elementelor şi legăturilor vor fi altele. De asemenea datele s-au introdus sub formă adimensională. În acest caz setul complet de instrucţiuni este cel prezentat în figura 6.9.

S-au calculat tensiunile în cele două cazuri şi s-au obţinut aceleaşi valori ale tensiunilor adimensionale. Se remarcă faptul că numărul de iteraţii prin care s-au calculat constantele de integrare în

```
* STRUCTURA NR. 111
  ELEMENTE
1 CIS 01
2 CIL IX
3 PLI 11
4 CIL X1
  LEGATURI
1 1,3E,2
2 3I,4
* DATE ADIM
CONSTANTE 1=0.3,3=2.1,4=1.
1 5=21.65151,7=1.,8=1.,9=3.235
2 5=21.65151,7=1.,8=1.,10=5.155,13=1.
3 5=10.7175,7=1.,8=2.0202,9=4.11815,10=2.552,11=0.1505
4 5=20.82,7=0.2428275,8=0.252525,10=4.957,13=1.
* REZOLVA

          **ATO1= 4
```

Fig. 6.9

cele două cazuri este diferit. Pentru a identifica mai uşor structurile cu care se lucrează, fiecăreia i s-a atribuit un număr ; în cazul de faţă 112, respectiv 111.

Pentru a putea compara rezultatele obţinute pentru cele două variante de calcul ale aceleaşi structuri, se reproduc curbele de variaţie ale tensiunii $\overline{\sigma}_{re}$ pentru fundul plan inelar, aşa cum se afişează ele la imprimanta calculatorului : în figura 6.10 pentru structura 112 (varianta din figura 6.5) iar în figura 6.11 pentru structura 111 (vari-

Scanned with OKEN Scanner

anta din fig. 6.8). În cele două grafice numărul de paşi este diferit, abscisele fiind metrice la prima variantă şi adimensionale la cea de a doua. Din acest motiv $\bar{\sigma}_{re\ max}$ nu s-a calculat exact în acelaşi punct şi cele două valori diferă într-o oarecare măsură.

6.6. Utilizarea programului pe calculatorul IBM 1130

Calculatorul IBM 1130, avînd o configuraţie care permite efectuarea foarte comodă a testărilor şi corecturilor subprogramelor, a fost preferat pentru punerea la punct a programului şi efectuarea unui număr de aplicaţii. De fapt toate structurile prezentate în lucrare au fost rezolvate pe acest calculator.

Calculatorul, are o memorie de 16 384 (16 k) cuvinte din care sistemul de operare ocupă 510 cuvinte. Calculatorul posedă două unităţi de memorie pe disc.

În aceste condiţii a fost posibilă utilizarea programului într-o formă pentru care s-a limitat matricea coeficienţilor sistemului de ecuaţii al constantelor de integrare la 20 × 20 termeni. S-a folosit segmentarea programului, subrutinele ACC, STRUC, DATA, ACE, SIST7, programul principal şi subrutinele specifice tipurilor de elemente fiind declarate segmente ale programului. Deoarece subrutina CON avea un volum mai mare ca al celorlalte segmente, s-a divizat în două subprograme, denumite CON1 şi CON2.

Timpul necesar pentru rezolvarea unei structuri de complexitatea celor prezentate în capitolul 7 — este de circa 10 minute, în medie. Durata calculului depinde de complexitatea structurii, de numărul iteraţiilor cu care se determină constantele de integrare şi de numărul şi tipul instrucţiunilor pentru calculul şi afişarea tensiunilor adimensionale.

Se precizează că pentru afişarea tensiunilor sub formă de grafic durata calculului este sensibil mai mare decît pentru celelalte variante.

6.7. Utilizarea programului pe calculatorul FELIX C-256

În vederea trecerii programului pe calculatorul FELIX C—256 s-au schimbat cartelele de comandă şi numerele logice ale periferice-lor, acestea fiind singurele modificări necesare. S-a utilizat şi în acest caz segmentarea programului, în modul prezentat la § 6.6.

Deoarece calculatorul FELIX C—256 lucrează cu cuvinte de 32 biţi, iar IBM 1130 cu cuvinte de 16 biţi, sistemele de operare fiind

Scanned with OKEN Scanner

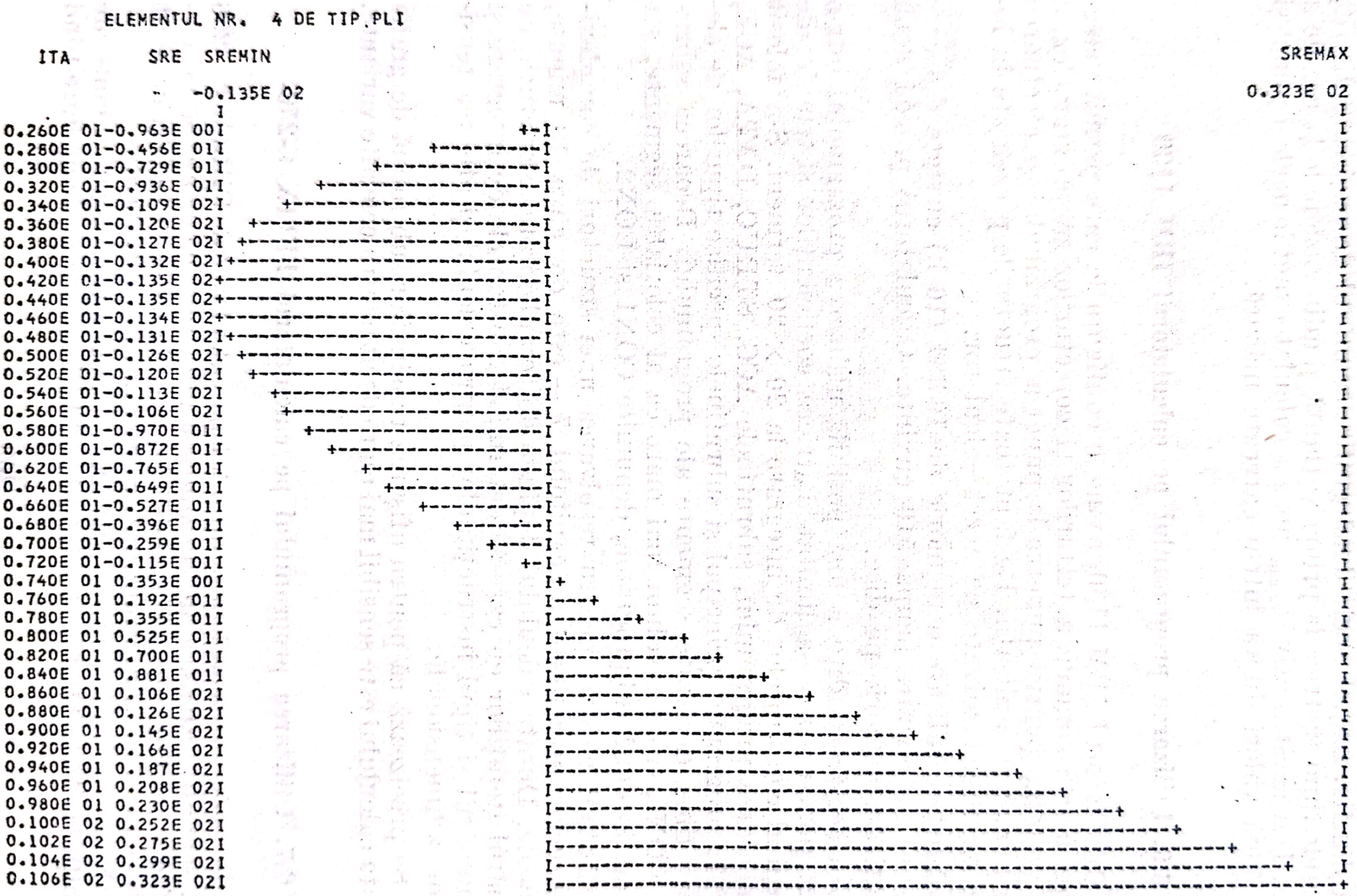

ELEMENTUL NR. 4 DE TIP PLI
ITA
SRE
SREMIN
SREMAX
-0.135E 02
0.323E 02
0.260E 01-0.963E 00
0.280E 01-0.456E 01
0.300E 01-0.729E 01
0.320E 01-0.936E 01
0.340E 01-0.109E 02
0.360E 01-0.120E 02
0.380E 01-0.127E 02
0.400E 01-0.132E 02
0.420E 01-0.135E 02
0.440E 01-0.135E 02
0.460E 01-0.134E 02
0.480E 01-0.131E 02
0.500E 01-0.126E 02
0.520E 01-0.120E 02
0.540E 01-0.113E 02
0.560E 01-0.106E 02
0.580E 01-0.970E 01
0.600E 01-0.872E 01
0.620E 01-0.765E 01
0.640E 01-0.649E 01
0.660E 01-0.527E 01
0.680E 01-0.396E 01
0.700E 01-0.259E 01
0.720E 01-0.115E 01
0.740E 01 0.353E 00
0.760E 01 0.192E 01
0.780E 01 0.355E 01
0.800E 01 0.525E 01
0.820E 01 0.700E 01
0.840E 01 0.881E 01
0.860E 01 0.106E 02
0.880E 01 0.126E 02
0.900E 01 0.145E 02
0.920E 01 0.166E 02
0.940E 01 0.187E 02
0.960E 01 0.208E 02
0.980E 01 0.230E 02
0.100E 02 0.252E 02
0.102E 02 0.275E 02
0.104E 02 0.299E 02
0.106E 02 0.323E 02

Fig. 6.10

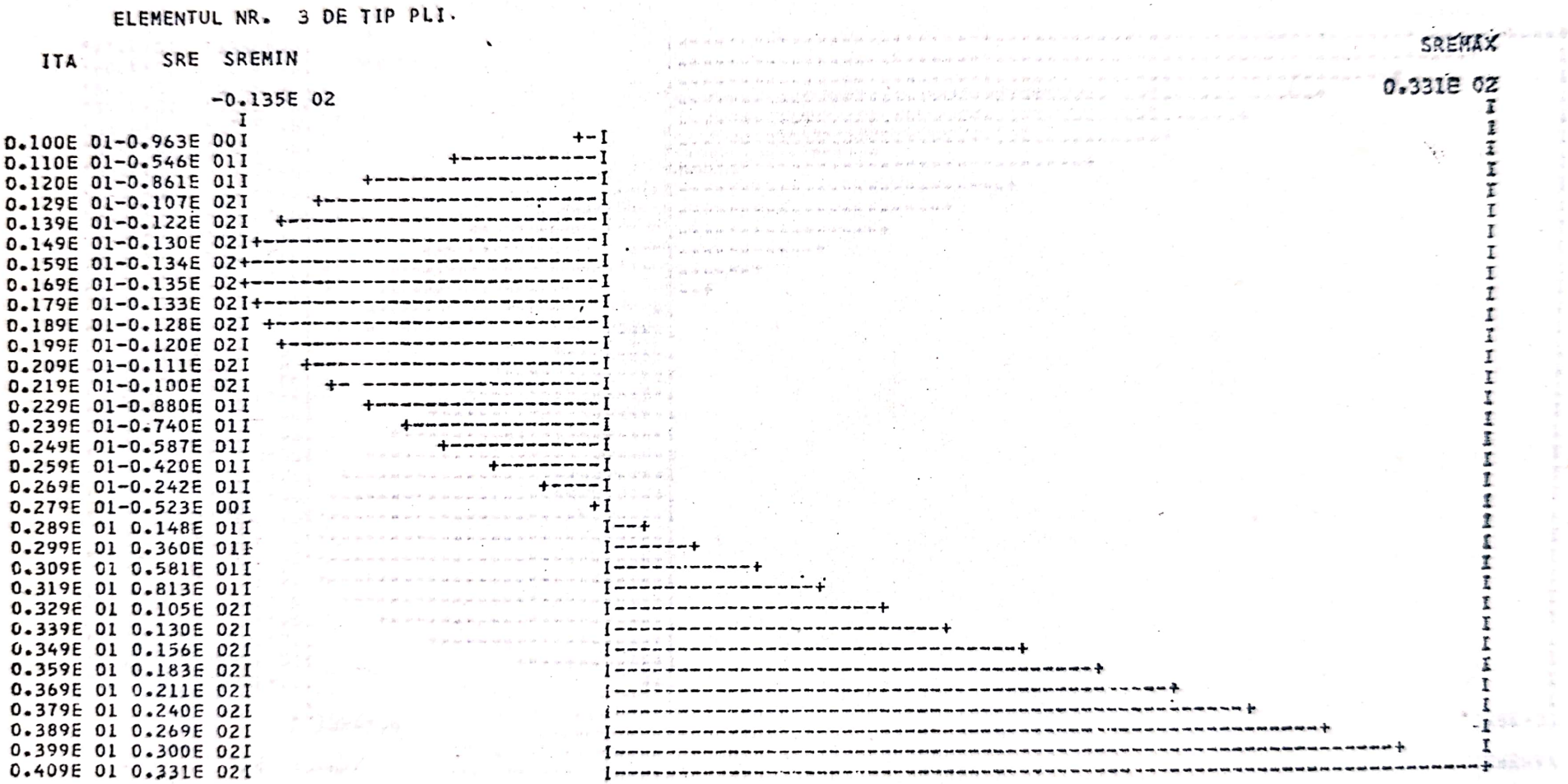


Fig. 6.11

Scanned with OKEN Scanner

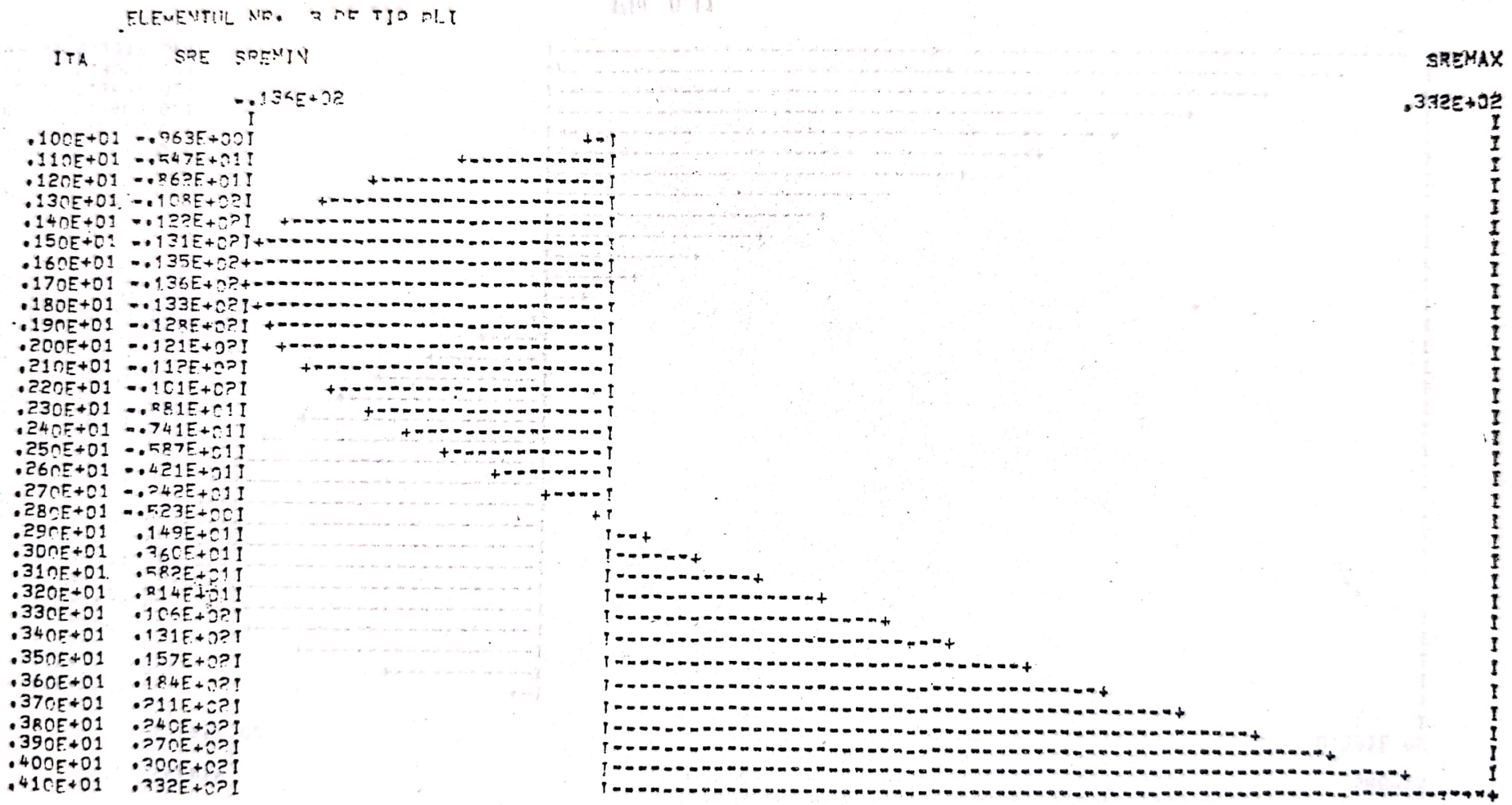
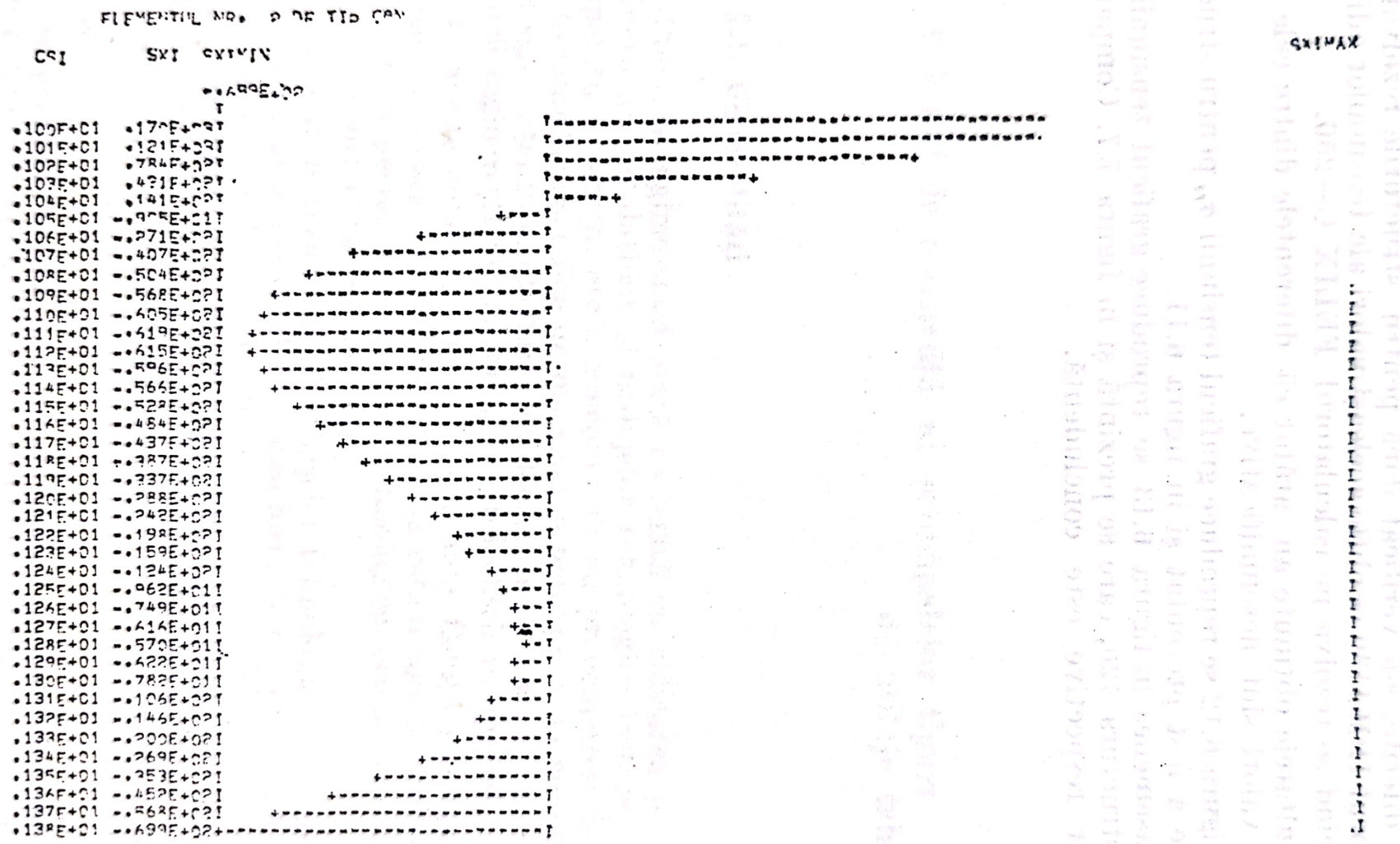

ELEMENTUL NR. 3 DE TIP PLI
ITA
SRE
SREMIN
SREMAX
-.134E+02
.332E+02
.100E+01 -.963E+00
.110E+01 -.547E+01
.120E+01 -.869E+01
.130E+01 -.108E+02
.140E+01 -.122E+02
.150E+01 -.131E+02
.160E+01 -.135E+02
.170E+01 -.136E+02
.180E+01 -.133E+02
.190E+01 -.128E+02
.200E+01 -.121E+02
.210E+01 -.112E+02
.220E+01 -.101E+02
.230E+01 -.881E+01
.240E+01 -.741E+01
.250E+01 -.587E+01
.260E+01 -.421E+01
.270E+01 -.242E+01
.280E+01 -.523E+00
.290E+01 .149E+01
.300E+01 .360E+01
.310E+01 .582E+01
.320E+01 .814E+01
.330E+01 .106E+02
.340E+01 .131E+02
.350E+01 .157E+02
.360E+01 .184E+02
.370E+01 .211E+02
.380E+01 .240E+02
.390E+01 .270E+02
.400E+01 .300E+02
.410E+01 .332E+02

Fig. 6.12



complet diferite, s-a verificat dacă pentru structurile rezolvate pe calculatorul IBM 1130 se obţin aceleaşi valori ale tensiunilor adimensionale cînd se rezolvă pe calculatorul FELIX C—256.

Rezultatele obţinute au arătat că diferenţele dintre cele două serii de valori sînt nesemnificative.

În figura 6.12 se reproduce graficul tensiunii $\overline{\sigma}_{re}$ pentru structura 111, care a fost prezentat şi în figura 6.11.

De asemenea în figura 6.13 se reproduce graficul tensiunii $\overline{\sigma}_{xi}$, pentru structura 120, care se prezintă şi în figura 7.7. Compararea graficelor respective este concludentă.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul VII

Calculul de rezistență al principalelor tipuri de utilaje tehnologice

7.1. Generalități

Practica inginerească arată că odată cu ridicarea parametrilor de lucru ai instalațiilor și utilajelor tehnologice (viteze, presiuni, temperaturi, turații, etc.), concomitent cu preocuparea de reducere a consumurilor specifice de material și manoperă, în condițiile creșterii siguranței în exploatare, are loc un proces de creștere a rolului gîndirii inginerești în general și al proiectării în special.

În aceste condiții, proiectarea trebuie făcută pe baze riguros științifice, în care calculul de rezistență este o componentă esențială, alături de aspectele constructive, tehnologice, economice, de exploatare și uneori chiar de montaj.

Calculul de rezistență al utilajelor tehnologice care pot fi schematizate ca structuri axial simetrice formate din plăci plane și curbe subțiri, este un calcul de verificare, deoarece astfel de structuri sînt static nedeterminate, pentru rezolvarea lor fiind necesară scrierea și a unor ecuații de deformații (v.§ 3.2). În consecință, calculul de rezistență și proiectarea sînt etape succesive ce se repetă de mai multe ori (eventual) pînă se elaborează soluția definitivă a utilajului respectiv.

Se prezintă în cele ce urmează stările de tensiune, determinate prin calcul cu ajutorul programului STAXIS, pentru principalele tipuri de utilaje tehnologice care se pot schematiza ca structuri axial

Scanned with OKEN Scanner

simetrice cu pereți subțiri. Unele din exemplele prezentate au fost sugerate de lucrările [5], [25], [31], [33], [42].

Avînd în vedere că programul STAXIS este general, structurile ce urmează sînt doar ilustrative pentru categoria de utilaje respectivă. Clasificarea acestora s-a făcut după tipul solicitării : presiune interioară, cîmp de temperatură sau forță de inerție produsă de mișcarea de rotație. De asemenea se precizează că prin volumul, scopul și destinația lucrării de față nu a fost posibilă și prezentarea unor aspecte constructive sau tehnologice. Acolo unde au fost strict necesare ele s-au pus în discuție, în acest scop utilizîndu-se indicații din lucrările [6], [41], [43], [44] precum și din normele [51], [52].

Pentru a se putea urmări mai ușor modul de scriere a instrucțiunilor pentru definirea structurilor și introducerea datelor, pentru exemplele ce urmează s-a procedat astfel :

— pe schița fiecărei structuri s-au numerotat elementele cu cifre înscrise în cerculeţe iar contururile de îmbinare cu cifre înscrise în pătrate ;

— pentru identificarea tipurilor și subtipurilor elementelor s-au folosit schițele din tabelul 3.2 ;

— în vederea introducerii mai comode, toate datele s-au definit cu precădere sub formă metrică : lungimile în cm, forțele în daN, presiunile în daN/cm^2 etc. ;

— datele de intrare pentru definirea materialului, geometriei și încărcării structurii s-au definit conform tabelului 3.1 ;

— abscisele punctelor în care s-au calculat tensiunile s-au definit pentru majoritatea cazurilor ca mărimi metrice (tabelul 4.1) ;

— pe schițele structurilor ce se calculează s-au notat cu I și E marginile corespunzătoare „începutului" și „sfîrșitului" elementelor cu ambele extremități de legătură. Aceasta permite urmărirea mai comodă a modului în care au fost scrise instrucțiunile pentru descrierea legăturilor, precum și identificarea originii absciselor punctelor în care s-au calculat tensiunile adimensionale : originea se află totdeauna la extremitatea I a elementului ;

— cotarea schițelor structurilor s-a făcut astfel încît să fie mai lesnicioasă urmărirea modului în care s-au scris instrucțiunile pentru introducerea datelor, ceea ce contravine într-o oarecare măsură regulilor obișnuite : de exemplu s-au cotat razele și nu diametrele, lungimile de la axele și suprafețele mediane etc.

Deoarece imprimanta calculatorului nu are decît caractere latine, alte tipuri de caractere nefiind admise nici de limbajul FORTRAN, pe listele cu rezultate tensiunile sînt notate S urmat de una din lite-

Scanned with OKEN Scanner

rele X, R, T, F, P care indică, în funcţie de tipul elementului, la care tensiune principală se face referirea şi anume respectiv $\overline{\sigma}_x$, $\overline{\sigma}_\rho$, $\overline{\sigma}_t$ $\overline{\sigma}_\varphi$, $\overline{\sigma}_\psi$. Urmează apoi literele E sau I care indică dacă tensiunea este într-un punct situat pe suprafaţa exterioară sau interioară a elementului. De exemplu, $\overline{\sigma}_{\rho_{ext}}$ se va afişa SRE.

Pentru tensiunile care se prezintă sub formă de grafic trasat de imprimanta calculatorului, se va avea în vedere că reprezentarea fiind discretă, acurateţea curbei ce se obţine este determinată de mărimea pasului de incrementare a abscisei : pentru fiecare valoare a abscisei se obţine un punct al curbei. Scara la care se figurează tensiunile adimensionale se obţine luînd în considerare faptul că totdeauna variaţiei tensiunii între limita minimă şi maximă îi corespund 100 de caractere (poziţii). Deci două reprezentări vor avea, în general, scări diferite.

Pe listele de afişare a rezultatelor calculelor se completează capete de tabel care arată semnificaţiile coloanelor ; abscisele sînt notate cu simbolurile lor adimensionale — CSI, ITA — chiar şi în cazul unor valori metrice, cînd de fapt ar trebui notate respectiv x, ρ, x_1 (v. tabelul 4.1).

Cînd se foloseşte pentru instrucţiunile de execuţie opţiunea pentru afişarea tensiunilor maxime, după valoarea fiecărei tensiuni urmează în paranteză, valoarea abscisei corespunzătoare tensiunii maxime respective.

Toate valorile tensiunilor sînt adimensionale. Pentru a afla valoarea reală a unei tensiuni oarecare, pentru un anumit element, se va multiplica valoarea tensiunii adimensionale cu cea a modulului de elasticitate al elementului respectiv (relaţia 3.5″).

Stările de tensiune ale structurilor sînt plane. Pentru verificări se vor calcula tensiunile echivalente după una din teoriile de rezistenţă cunoscute, valorile obţinute comparîndu-se cu rezistenţele admisibile.

Pe de altă parte, trebuie remarcat faptul că pentru multe din structurile ce s-au calculat, pentru care se prezintă stările de tensiune în cele ce urmează, s-au obţinut valori mari ale tensiunilor numai local, în general la îmbinările unor elemente ale structurii. În astfel de cazuri trebuie acceptate valori mai mari, în comparaţie cu cele uzuale, pentru rezistenţele admisibile, mai ales dacă materialul din care este confecţionată structura este tenace.

Fiecare structură a primit un număr în vederea unei identificări mai comode ; referirile la o anumită structură se vor face apelînd numărul (identificatorul) respectiv.

Scanned with OKEN Scanner

7.2. Calculul recipientelor sub presiune

Pentru această categorie de utilaje solicitarea principală este presiunea interioară, la care se mai adaugă, eventual, sarcini provenind din greutatea proprie, din greutatea fluidului ce se află în recipient sau din interacţiunea cu alte echipamente.

7.2.1. *Vas de fermentaţie (Structura 120)*

În figura 7.1 se prezintă schiţa şi dimensiunile unui vas de fermentaţie format dintr-o manta cilindrică (elementul *1*), un fund tronconic (elementul *2*) şi o piesă de rezemare (elementul 3) [40], de grosime mult mai mare (10 cm) în raport cu restul structurii, ceea ce face ca, de fapt, fundul tronconic să fie încastrat la capătul de jos.

Presiunea interioară s-a considerat de 0,5 daN/cm² pentru toate elementele vasului; în plus pentru fundul tronconic s-a introdus o

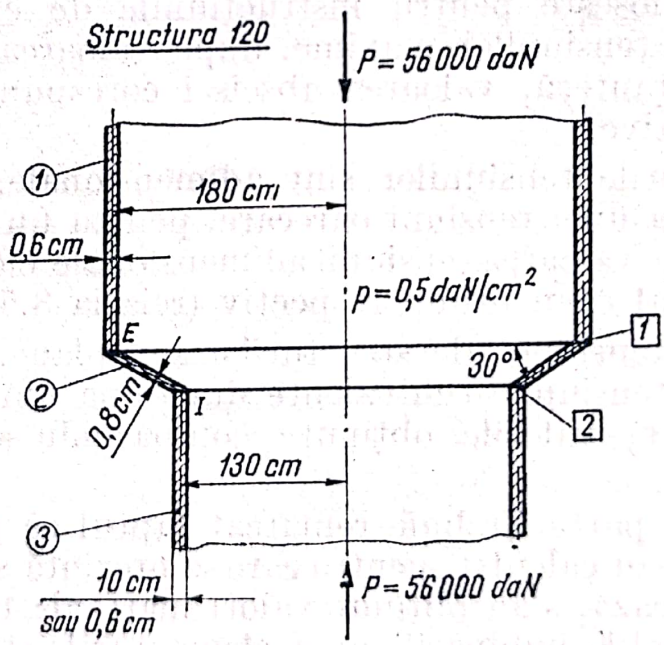


Fig. 7.1

forţă axială de 56 000 daN, reprezentînd greutatea proprie a vasului şi a materialului din interiorul său.

Lista instrucţiunilor pentru definirea structurii şi a datelor este prezentată în figura 7.2. S-a considerat $\mu = 0,3$ şi $E = 2$. Mesajul

Scanned with OKEN Scanner

**AT01 =2 arată că determinarea constantelor de integrare s-a făcut prin două interaţii.

Variaţiile celor patru tensiuni adimensionale principale în lungul axei, pentru elementele *1* şi *2*, funcţie de abscise adimensionale, se prezintă sub formă de grafice în figurile 7.3 — 7.10. Pentru interpretarea corectă a acestora trebuie avută în vedere, pentru fiecare element al structurii, poziţia originii abscisei în raport cu structura în ansamblu (v. tabelul 4.1). Astfel, pentru elementul *1* originea este la îmbinarea

```
* STRUCTURA NR. 120
  ELEMENTE
1 CIL IX
2 CON 11X
3 CIL XI
  LEGATURI
1 1,2E
2 3,2I
* DATE METRIC
CONSTANTE 1=0.3,3=2.,10=0.5
1 5=180.,6=0.6
2 5=180.,6=0.8,7=130.,8=0.5235988,11=-56000.
3 5=130.,6=10.
* REZOLVA

          **AT01= 2
```

Fig. 7.2

cu fundul tronconic, iar pentru acesta din urmă, la îmbinarea cu piesa de rezemare.

În piesa de rezemare tensiunile au valori neglijabile în raport cu cele din restul structurii.

O altă variantă pentru care s-au calculat tensiunile a fost cînd forţa axială de 56 000 daN este nulă. Pentru a ilustra modul în care se schimbă solicitarea în acest caz, se reproduce în figura 7.11 graficul tensiunii $\overline{\sigma}_{xe}$ pentru fundul conic. Comparînd figurile 7.8 şi 7.11 rezultă că forţa $P = 56\,000$ daN produce o descărcare a fundului, solicitările fiind mai mari în cazul $P = 0$.

Dacă grosimea piesei de rezemare *3* se consideră 0,6 cm, aceeaşi tensiune $\overline{\sigma}_{xe}$ pentru fundul tronconic va avea o variaţie ca în figura 7.12. Aşa cum era şi de aşteptat, la îmbinarea fundului cu elementul *3* are loc o variaţie importantă a tensiunii $\overline{\sigma}_{xe}$ (de la — 39 la + 360) ca urmare a modificării grosimii acestuia, pe cînd la îmbinarea fundului cu elementul *1*, a cărui grosime rămîne neschimbată, variaţia tensiunii $\overline{\sigma}_{xe}$ este neînsemnată (de la —549 la —546).

Scanned with OKEN Scanner

ELEMENTUL NR. 1 DE TIP CIL

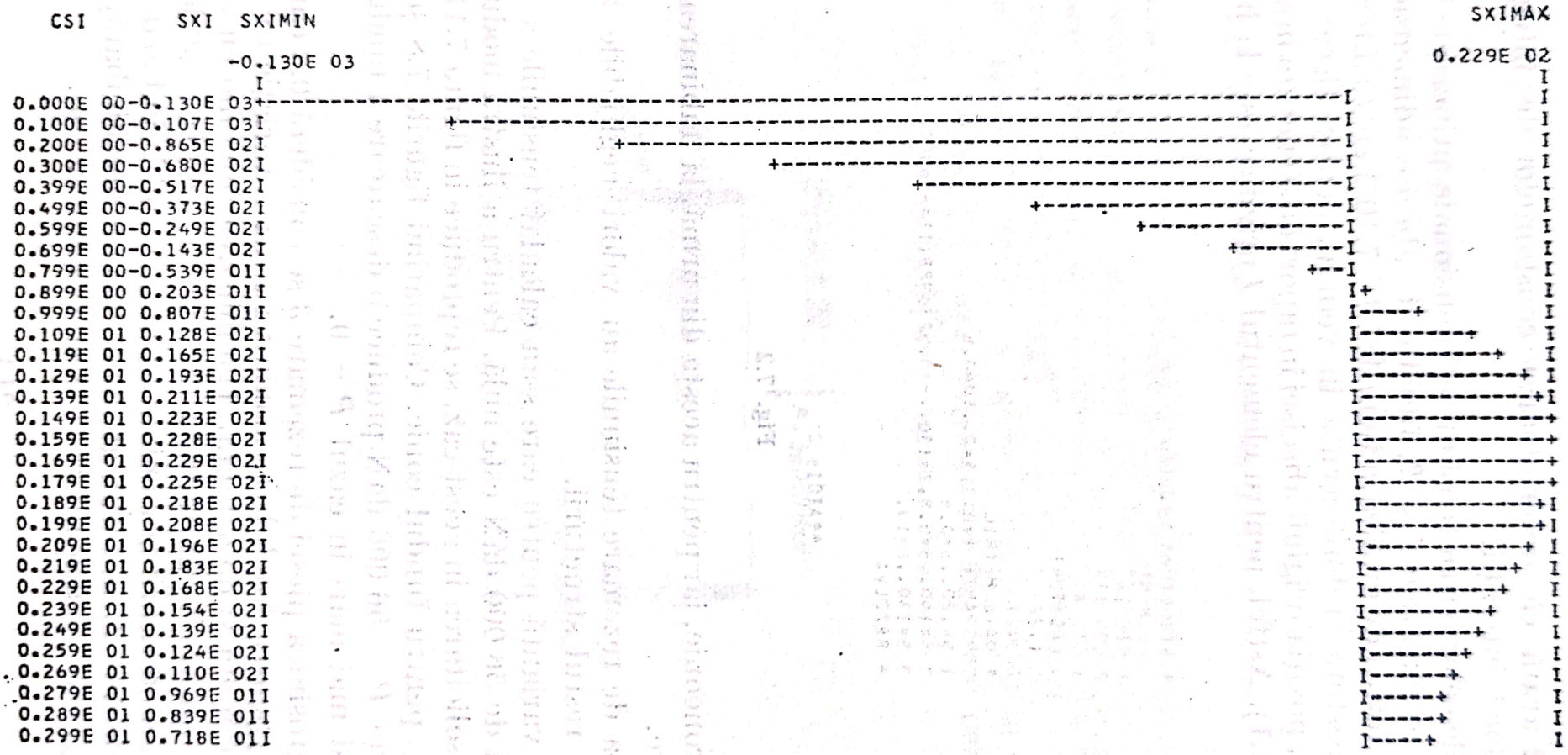


Fig. 7.3

Scanned with OKEN Scanner

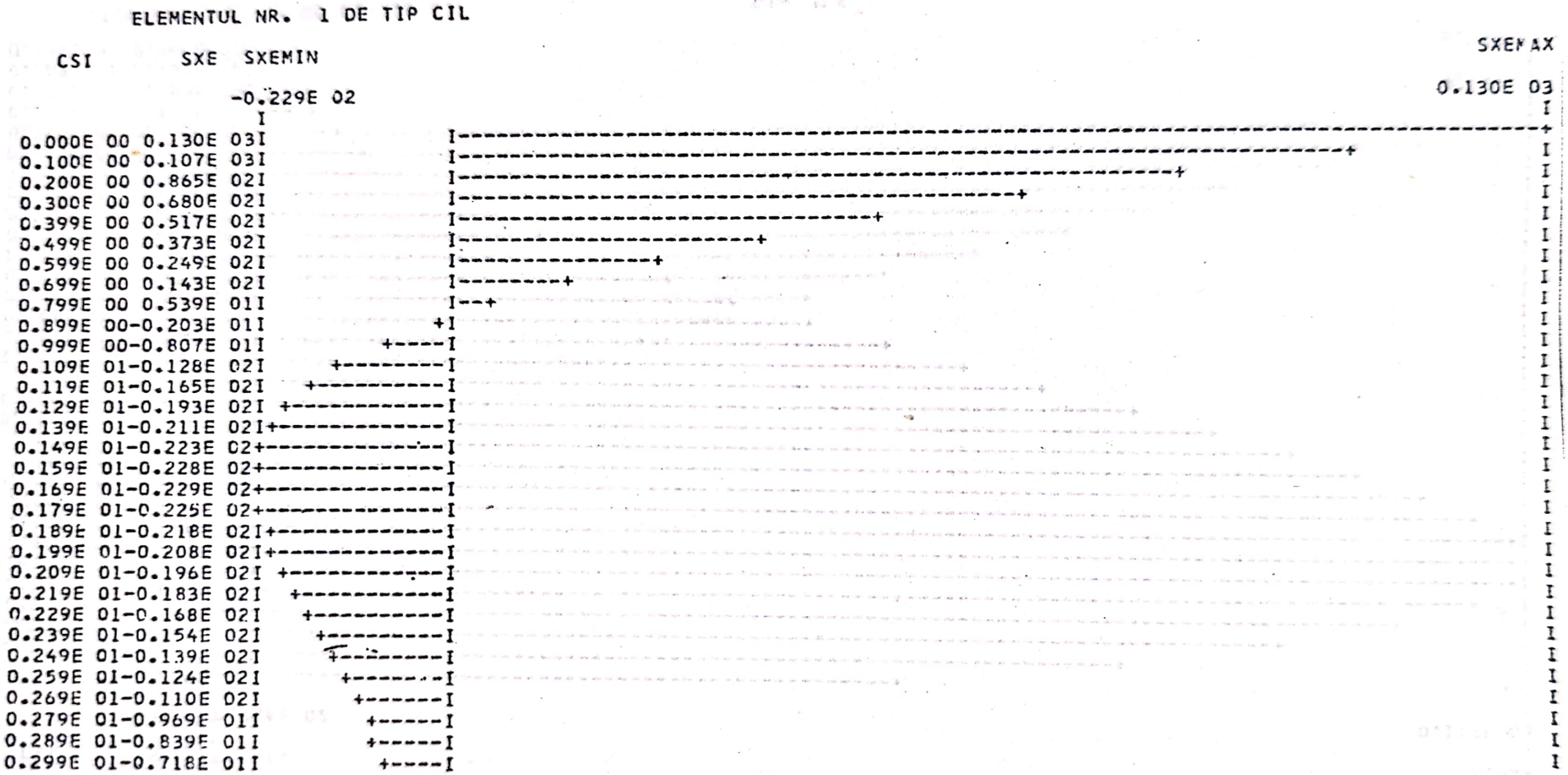


Fig. 7.4

Scanned with OKEN Scanner

```
ELEMENTUL NR.  1 DE TIP CIL

CSI        SFI  SFIMIN                                                                                                  SFIMAX

                0.746E 02                                                                                              0.117E 03
                 I                                                                                                          I
0.000E 00 0.963E 02I-------------------------------------------------+                                                      I
0.100E 00 0.103E 03I-------------------------------------------------------------------+                                    I
0.200E 00 0.109E 03I-------------------------------------------------------------------------------------+                   I
0.300E 00 0.113E 03I-------------------------------------------------------------------------------------------------+        I
0.399E 00 0.115E 03I-------------------------------------------------------------------------------------------------------+  I
0.499E 00 0.116E 03I-------------------------------------------------------------------------------------------------------+I
0.599E 00 0.117E 03I-------------------------------------------------------------------------------------------------------+
0.699E 00 0.116E 03I-------------------------------------------------------------------------------------------------------+I
0.799E 00 0.115E 03I-------------------------------------------------------------------------------------------------------+  I
0.899E 00 0.113E 03I-------------------------------------------------------------------------------------------------+       I
0.999E 00 0.111E 03I-------------------------------------------------------------------------------------------+            I
0.109E 01 0.109E 03I-------------------------------------------------------------------------------------+                  I
0.119E 01 0.106E 03I-------------------------------------------------------------------------------+                         I
0.129E 01 0.104E 03I-------------------------------------------------------------------------+                               I
0.139E 01 0.101E 03I-------------------------------------------------------------------+                                     I
0.149E 01 0.986E 02I-------------------------------------------------------------+                                           I
0.159E 01 0.959E 02I-------------------------------------------------------+                                                 I
0.169E 01 0.934E 02I-------------------------------------------------+                                                       I
0.179E 01 0.910E 02I-------------------------------------------+                                                             I
0.189E 01 0.887E 02I-------------------------------------+                                                                   I
0.199E 01 0.866E 02I-------------------------------+                                                                         I
0.209E 01 0.847E 02I-----------------------+                                                                                 I
0.219E 01 0.829E 02I-------------------+                                                                                     I
0.229E 01 0.813E 02I-----------------+                                                                                       I
0.239E 01 0.799E 02I-----------+                                                                                             I
0.249E 01 0.787E 02I---------+                                                                                               I
0.259E 01 0.776E 02I-------+                                                                                                 I
0.269E 01 0.767E 02I----+                                                                                                    I
0.279E 01 0.759E 02I--+                                                                                                      I
0.289E 01 0.752E 02I+                                                                                                        I
0.299E 01 0.746E 02+                                                                                                         I
```

Fig. 7.5

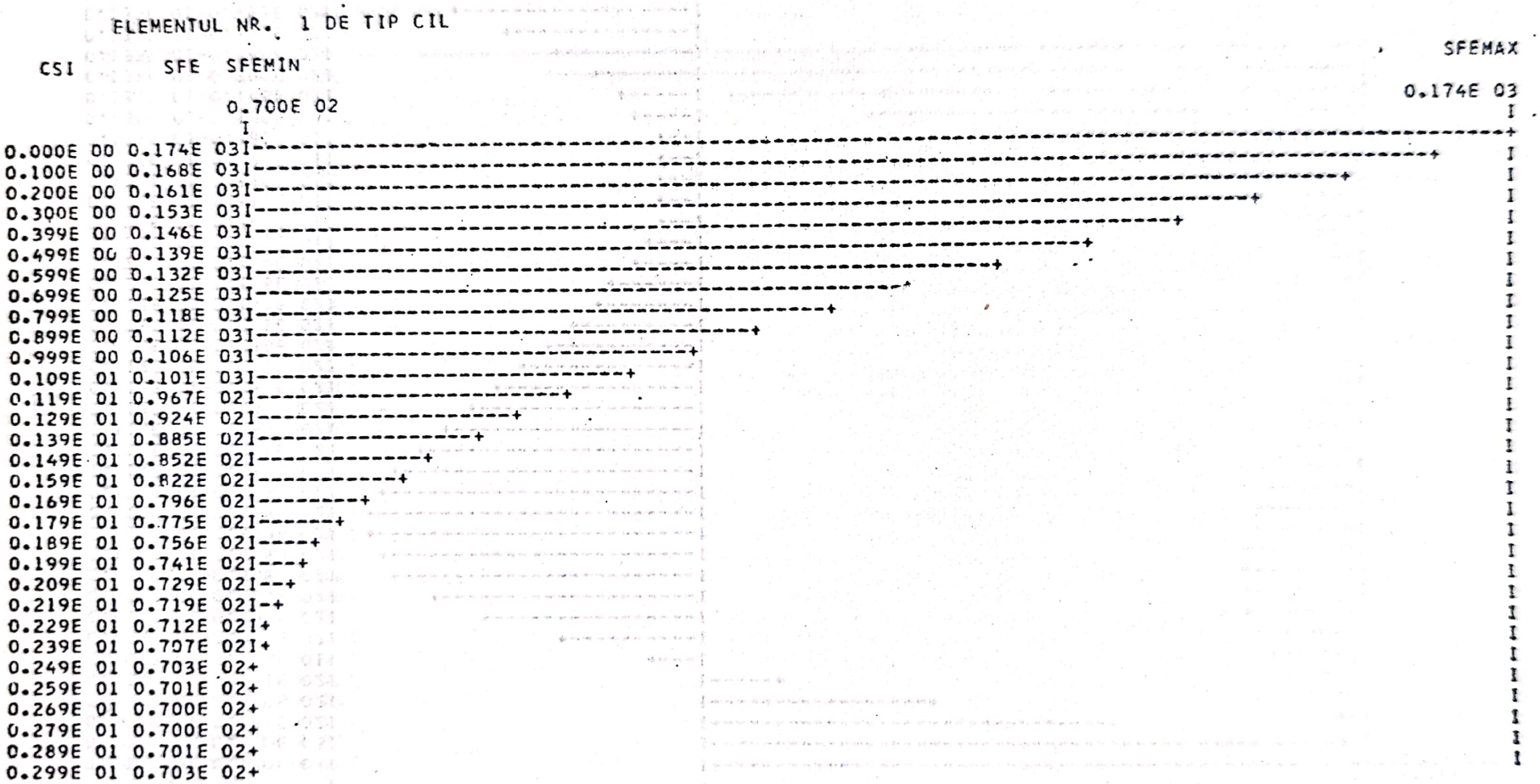


Fig. 7.6

Scanned with OKEN Scanner

ELEMENTUL NR. 2 DE TIP CON

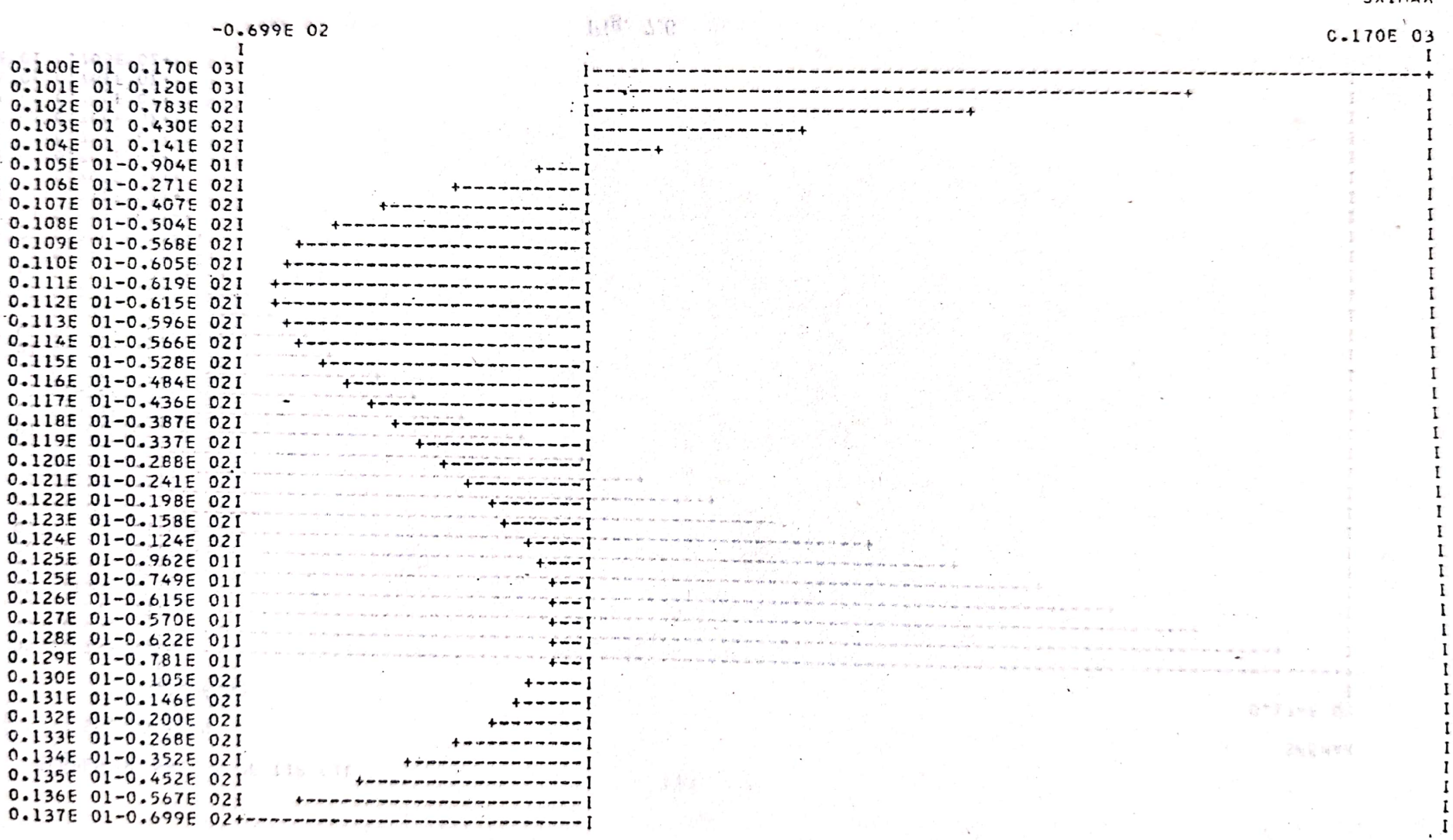


Fig. 7.7

ELEMENTUL NR. 2 DE TIP CON

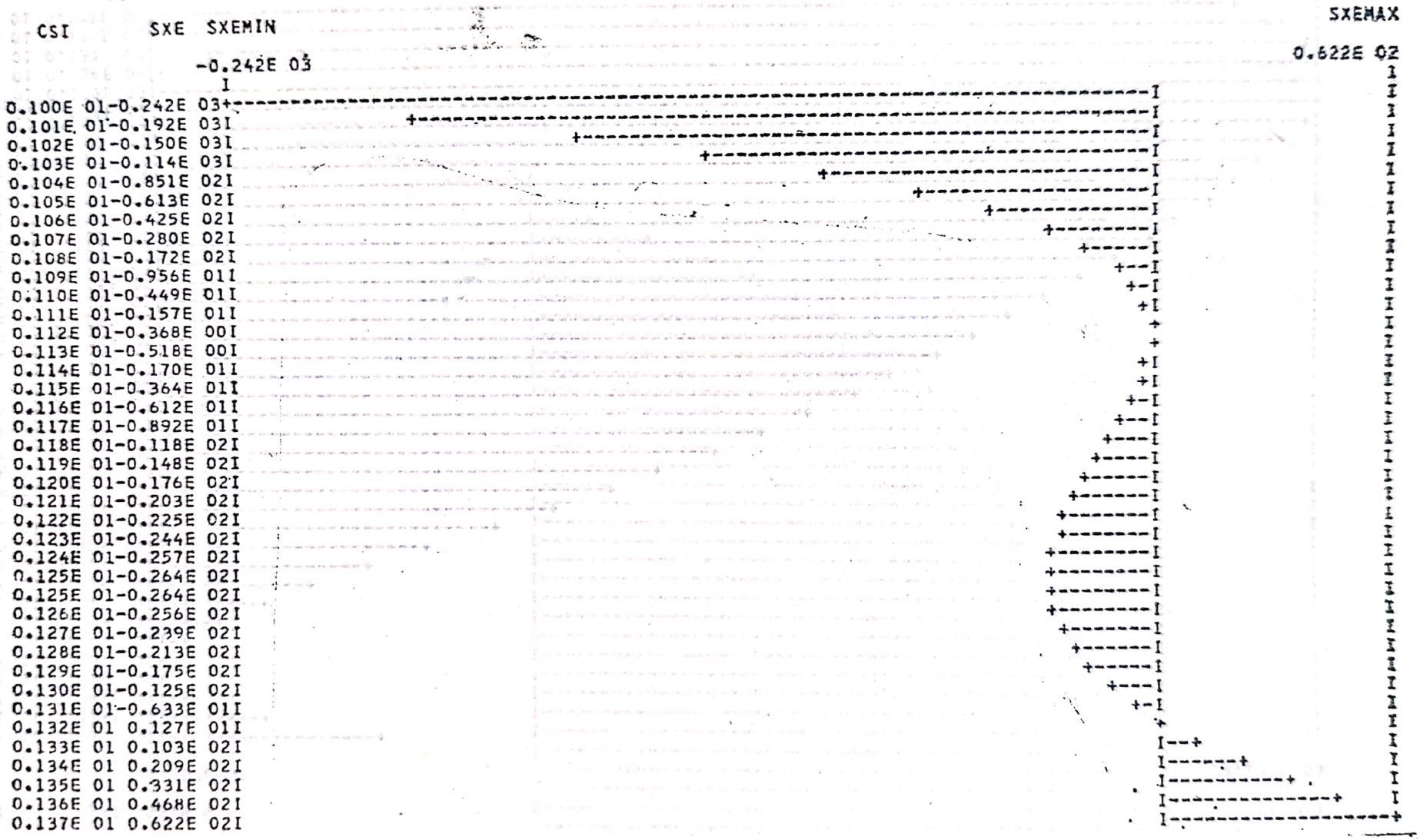


Fig. 7.8

ELEMENTUL NR. 2 DE TIP CON

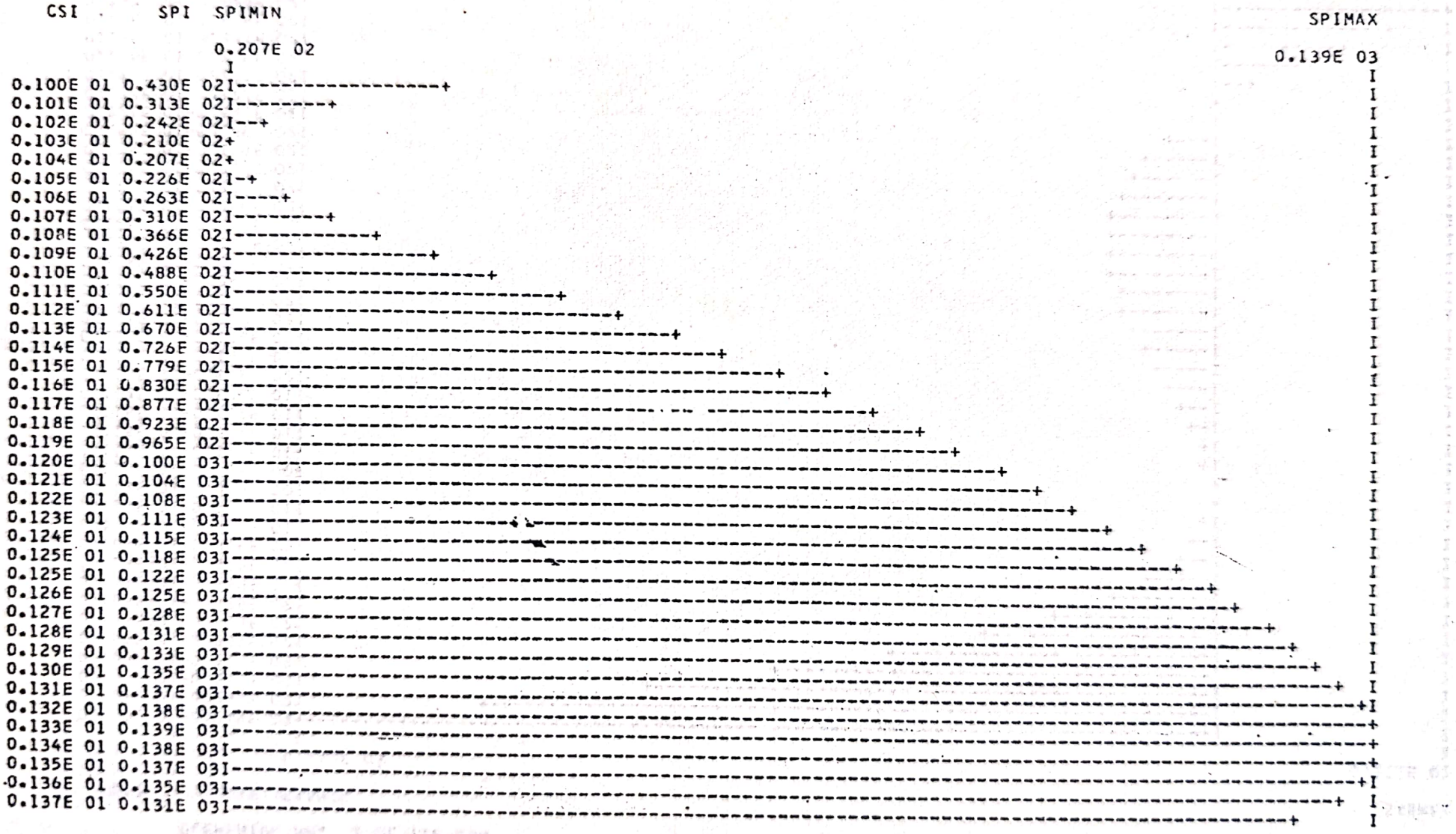


Fig. 7.9

Scanned with OKEN Scanner

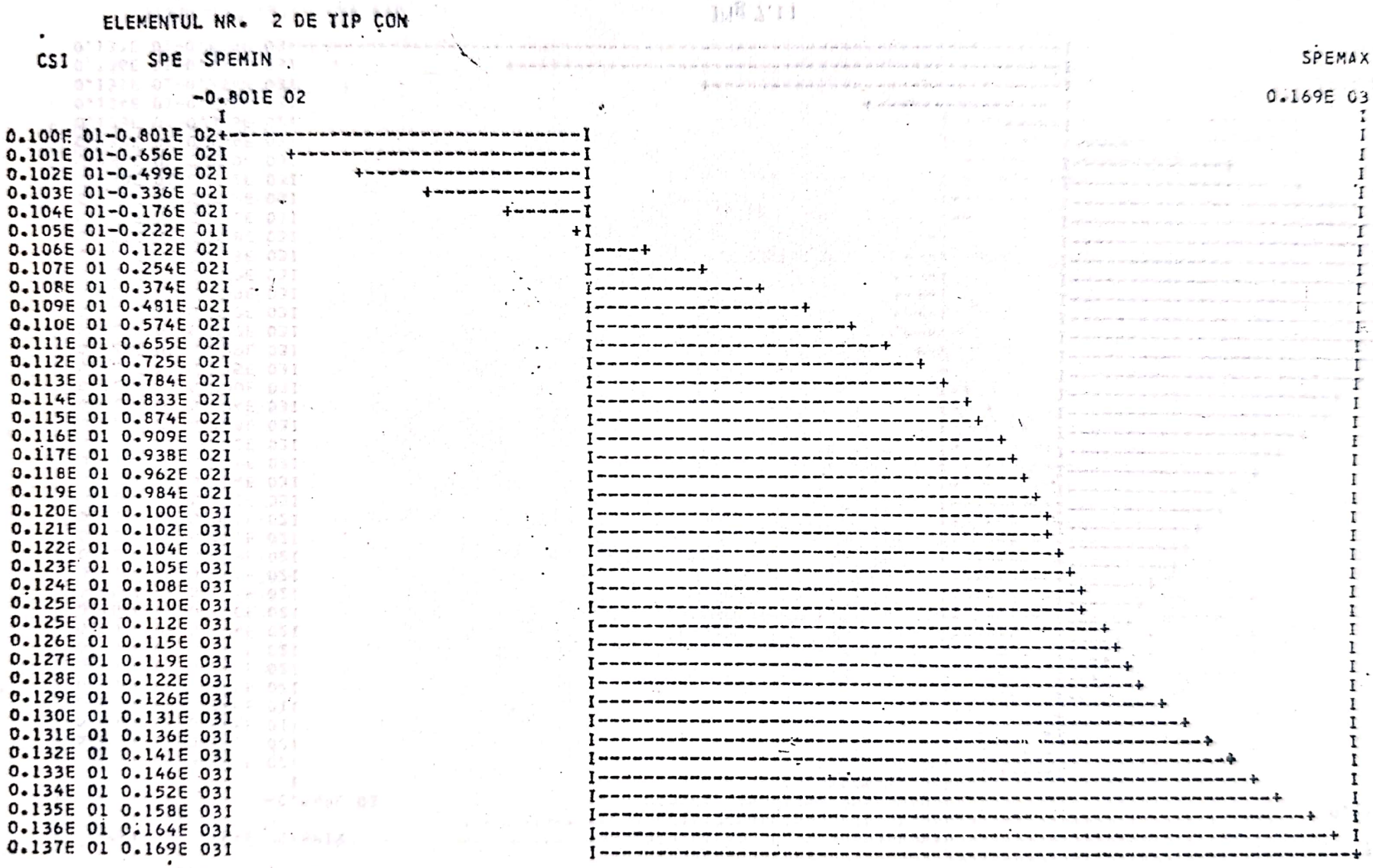

ELEMENTUL NR. 2 DE TIP CON
CSI
SPE
SPEMIN
SPEMAX
-0.801E 02
0.169E 03
0.100E 01-0.801E 02
0.101E 01-0.656E 02
0.102E 01-0.499E 02
0.103E 01-0.336E 02
0.104E 01-0.176E 02
0.105E 01-0.222E 01
0.106E 01 0.122E 02
0.107E 01 0.254E 02
0.108E 01 0.374E 02
0.109E 01 0.481E 02
0.110E 01 0.574E 02
0.111E 01 0.655E 02
0.112E 01 0.725E 02
0.113E 01 0.784E 02
0.114E 01 0.833E 02
0.115E 01 0.874E 02
0.116E 01 0.909E 02
0.117E 01 0.938E 02
0.118E 01 0.962E 02
0.119E 01 0.984E 02
0.120E 01 0.100E 03
0.121E 01 0.102E 03
0.122E 01 0.104E 03
0.123E 01 0.105E 03
0.124E 01 0.108E 03
0.125E 01 0.110E 03
0.125E 01 0.112E 03
0.126E 01 0.115E 03
0.127E 01 0.119E 03
0.128E 01 0.122E 03
0.129E 01 0.126E 03
0.130E 01 0.131E 03
0.131E 01 0.136E 03
0.132E 01 0.141E 03
0.133E 01 0.146E 03
0.134E 01 0.152E 03
0.135E 01 0.158E 03
0.136E 01 0.164E 03
0.137E 01 0.169E 03

Fig. 7.10

ELEMENTUL NR. 2 DE TIP CON

CSI	SXE	SXEMIN
		-0.549E 03
0.100E 01	-0.390E 02	
0.101E 01	-0.231E 02	
0.102E 01	-0.906E 01	
0.103E 01	0.340E 01	
0.104E 01	0.145E 02	
0.105E 01	0.245E 02	
0.106E 01	0.337E 02	
0.107E 01	0.424E 02	
0.108E 01	0.510E 02	
0.109E 01	0.595E 02	
0.110E 01	0.685E 02	
0.111E 01	0.779E 02	
0.112E 01	0.881E 02	
0.113E 01	0.991E 02	
0.114E 01	0.111E 03	
0.115E 01	0.124E 03	
0.116E 01	0.138E 03	
0.117E 01	0.152E 03	
0.118E 01	0.168E 03	
0.119E 01	0.184E 03	
0.120E 01	0.200E 03	
0.121E 01	0.215E 03	
0.122E 01	0.229E 03	
0.123E 01	0.242E 03	
0.124E 01	0.252E 03	
0.125E 01	0.259E 03	
0.125E 01	0.262E 03	
0.126E 01	0.258E 03	
0.127E 01	0.248E 03	
0.128E 01	0.230E 03	
0.129E 01	0.202E 03	
0.130E 01	0.162E 03	
0.131E 01	0.110E 03	
0.132E 01	0.444E 02	
0.133E 01	-0.376E 02	
0.134E 01	-0.136E 03	
0.135E 01	-0.254E 03	
0.136E 01	-0.391E 03	
0.137E 01	-0.549E 03	

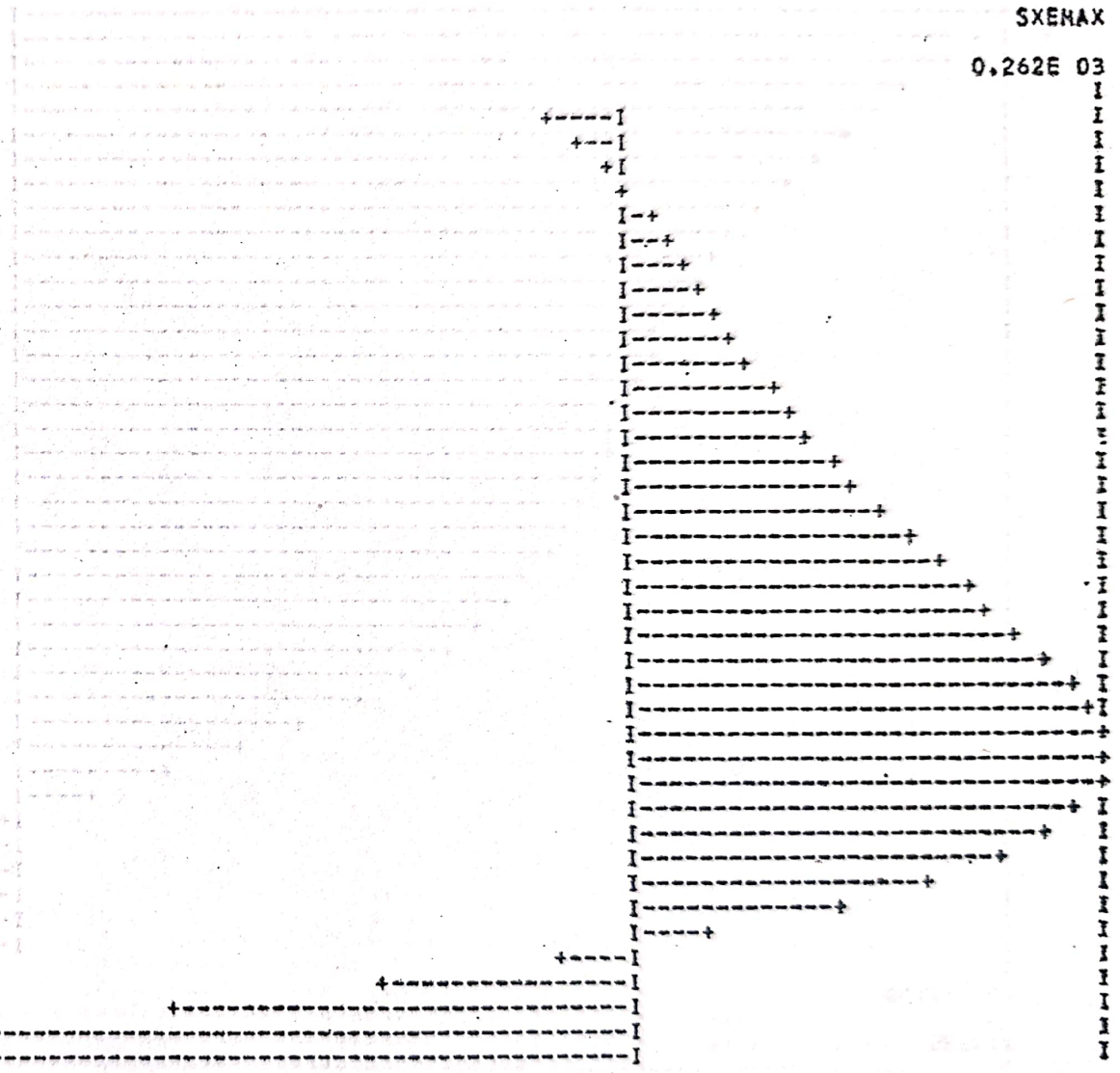


Fig.7.11

Scanned with OKEN Scanner

ELEMENTUL NR. 2 DE TIP CON

CSI	SXE. SXEMIN
	-0.546E 03
0.100E 01	0.369E 03
0.101E 01	0.266E 03
0.102E 01	0.182E 03
0.103E 01	0.113E 03
0.104E 01	0.608E 02
0.105E 01	0.208E 02
0.106E 01	-0.768E 01
0.107E 01	-0.262E 02
0.108E 01	-0.363E 02
0.109E 01	-0.393E 02
0.110E 01	-0.361E 02
0.111E 01	-0.280E 02
0.112E 01	-0.157E 02
0.113E 01	-0.140E-01
0.114E 01	0.184E 02
0.115E 01	0.390E 02
0.116E 01	0.612E 02
0.117E 01	0.845E 02
0.118E 01	0.108E 03
0.119E 01	0.132E 03
0.120E 01	0.156E 03
0.121E 01	0.178E 03
0.122E 01	0.199E 03
0.123E 01	0.218E 03
0.124E 01	0.233E 03
0.125E 01	0.245E 03
0.125E 01	0.251E 03
0.126E 01	0.251E 03
0.127E 01	0.243E 03
0.128E 01	0.227E 03
0.129E 01	0.201E 03
0.130E 01	0.163E 03
0.131E 01	0.112E 03
0.132E 01	0.470E 02
0.133E 01	-0.344E 02
0.134E 01	-0.133E 03
0.135E 01	-0.250E 03
0.136E 01	-0.388E 03
0.137E 01	-0.546E 03

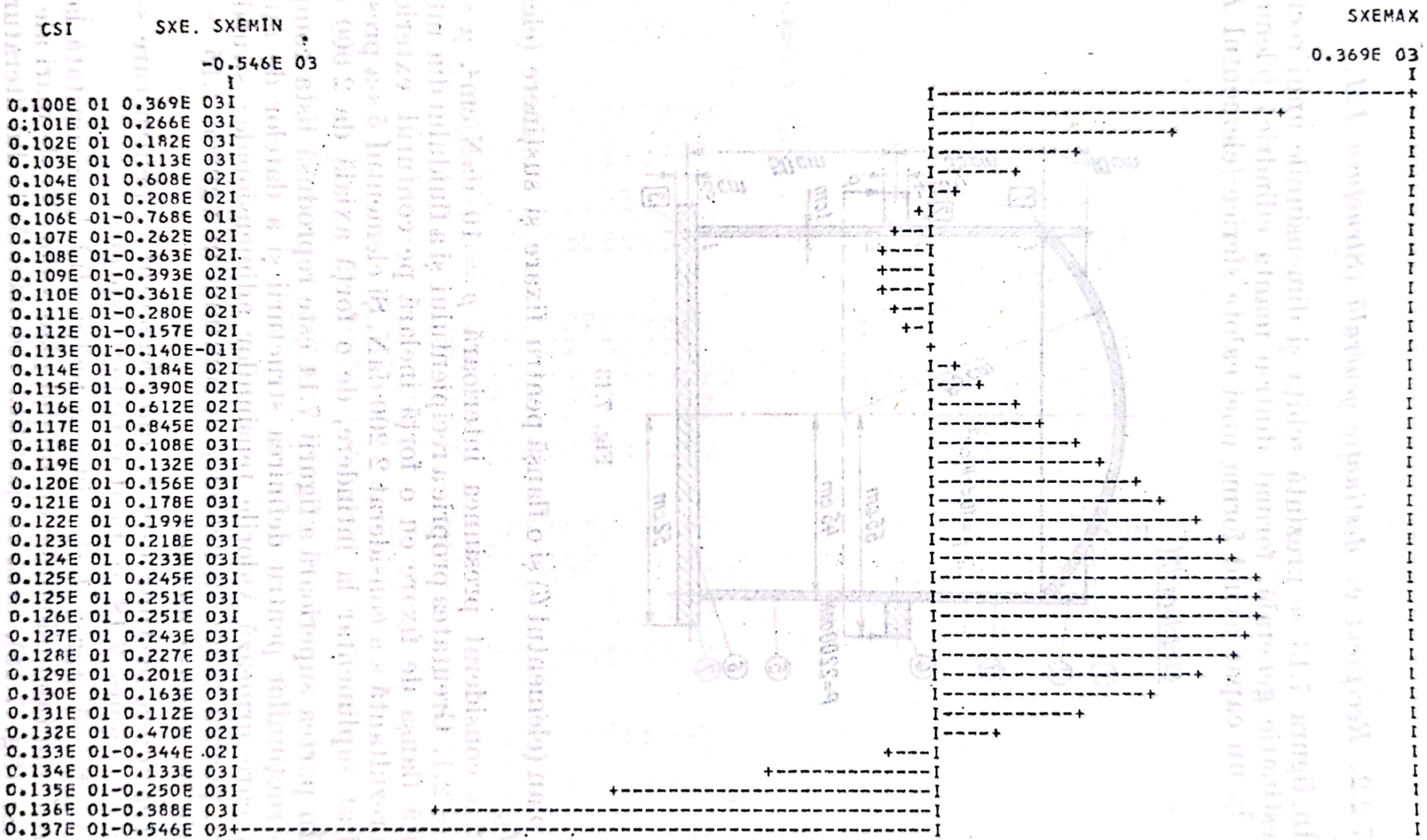


Fig. 7.12

Scanned with OKEN Scanner

7.2.2. *Recipient cu destinaţie generală (Structura 121)*

În figura 7.13 se prezintă schiţa şi dimensiunile unui recipient cu destinaţie generală, format dintr-o manta cilindrică (elementele *2*, *3*, *5*), un capac avînd forma unei calote sferice (elementul *1*), un

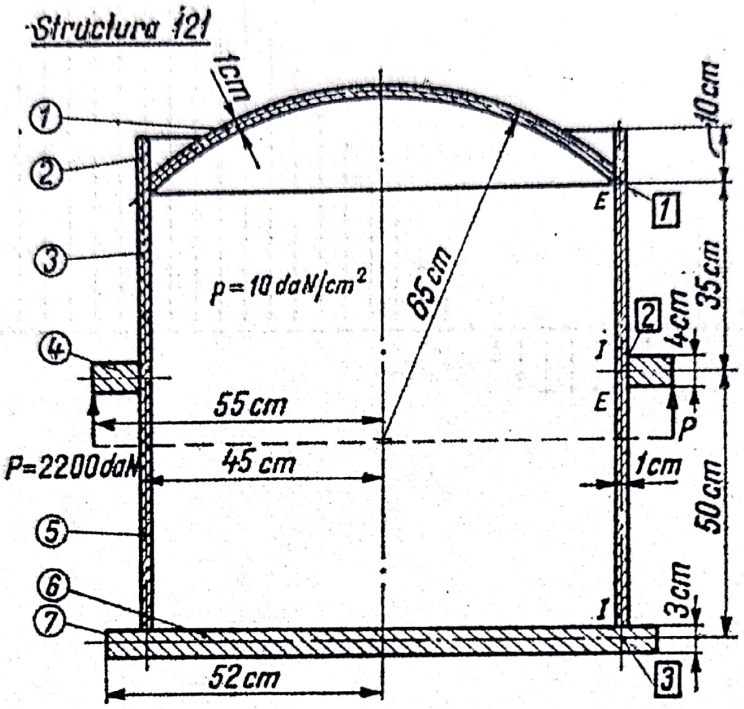


Fig. 7.13

fund plan (elementul *6*) şi o flanşă pentru fixare şi susţinere (elementul *4*).

S-a considerat presiunea interioară $p = 10$ daN/cm², $\mu = 0{,}3$ şi $E = 2{,}1$. Greutatea proprie a recipientului şi a fluidului din interior solicită flanşa de fixare cu o forţă inelară pe conturul exterior, a cărei rezultantă s-a considerat 2 200 daN. Şi elementul *5* s-a presupus solicitat suplimentar la întindere, de o forţă axială de 2 000 daN.

În partea superioară a figurii 7.14 este reprodusă lista completă a instrucţiunilor pentru definirea structurii şi a datelor de intrare, după care urmează valorile tensiunilor adimensionale; şirurile de valori, pentru toate elementele, se continuă în figurile 7.15 —7.17, funcţie de abscise metrice.

Tensiunea maximă este $\overline{\sigma}_{at}$ din elementul *5*, pentru care s-a reprodus în figura 7.18 graficul variaţiei respective.

Analizînd starea de tensiune a recipientului, se constată la îmbinarea mantalei cilindrice cu fundul plan valori locale mari ale tensiunilor (fig. 7.18), ceea ce justifică recomandările din literatură ca

```
* STRUCTURA NR. 121
  ELEMENTE
1 SFC 1X
2 CIS 10
3 CIS 11
4 PLI 10
5 CIS 11
6 PLA
7 PLI 10
  LEGATURI
1 2,3E,1
2 3I,5E,4
3 5I,6,7
* DATE METRIC  (CM SI DAN)
CONSTANTE 1=0.3,3=2.1
1 5=65.,6=1.,8=0.764682,10=10.
2 5=45.,6=1.,7=10.
3 5=45.,6=1.,7=35.,10=10.
4 5=55.,6=4.,7=45.,11=2200.
5 5=45.,6=1.,7=50. ,10=10.,11=2000.
6 5=45.,6=3.,10=10.
7 5=52.,6=3.,7=45.
* REZOLVA
```

**AT01= 1

1 T,M,PASI 0.,22,2.

FI	SFI	SFE	SPI	SPE
0.0000000E 00	0.1540018E 03	0.1555220E 03	0.1540984E 03	0.1545544E 03
0.2000000E 01	0.1534099E 03	0.1552158E 03	0.1533462E 03	0.1552239E 03
0.4000000E 01	0.1536245E 03	0.1549197E 03	0.1533698E 03	0.1549521E 03
0.6000000E 01	0.1453067E 03	0.1632114E 03	0.1452688E 03	0.1519094E 03
0.8000001E 01	0.1498992E 03	0.1584714E 03	0.1491643E 03	0.1524282E 03
0.1000000E 02	0.1546255E 03	0.1536088E 03	0.1530868E 03	0.1528231E 03
0.1200000E 02	0.1599735E 03	0.1481946E 03	0.1576105E 03	0.1533317E 03
0.1400000E 02	0.1659169E 03	0.1423177E 03	0.1629222E 03	0.1541626E 03
0.1600000E 02	0.1719885E 03	0.1365178E 03	0.1689182E 03	0.1555510E 03
0.1800000E 02	0.1772225E 03	0.1318382E 03	0.1751611E 03	0.1577627E 03
0.2000000E 02	0.1800913E 03	0.1298758E 03	0.1807966E 03	0.1610608E 03
0.2200000E 02	0.1785115E 03	0.1327534E 03	0.1844699E 03	0.1656255E 03
0.2400000E 02	0.1699982E 03	0.1429347E 03	0.1842848E 03	0.1714129E 03
0.2600000E 02	0.1520548E 03	0.1627935E 03	0.1778540E 03	0.1779385E 03
0.2800000E 02	0.1228905E 03	0.1938522E 03	0.1625029E 03	0.1839832E 03
0.3000000E 02	0.8252790E 02	0.2356318E 03	0.1356972E 03	0.1872412E 03
0.3200000E 02	0.3429942E 02	0.2841306E 03	0.9576063E 02	0.1839732E 03
0.3400000E 02	-0.1340171E 02	0.3300849E 03	0.4292446E 02	0.1687905E 03
0.3600000E 02	-0.4544991E 02	0.3573743E 03	-0.1930179E 02	0.1347797E 03
0.3800000E 02	-0.3902021E 02	0.3422235E 03	-0.8254409E 02	0.7428509E 02
0.4000000E 02	0.3571606E 02	0.2541872E 03	-0.1320064E 03	-0.1924481E 02
0.4200000E 02	0.2119324E 03	0.6023249E 02	-0.1453641E 03	-0.1478739E 03

2 T,M,PASI 0.,21,0.5

CSI	SXI	SXE	SFI	SFE
0.0000000E 00	0.7581719E 03	-0.7581719E 03	-0.5564191E 01	-0.4604672E 03
0.5000000E 00	0.6542868E 03	-0.6542868E 03	-0.5164617E 02	-0.4442182E 03
0.1000000E 01	0.5586479E 03	-0.5586479E 03	-0.8863188E 02	-0.4238205E 03
0.1500000E 01	0.4715341E 03	-0.4715341E 03	-0.1174042E 03	-0.4003247E 03

Fig. 7.14

0.1999999E 01	0.3930361E 03	-0.3930361E 03	-0.1388169E 03	-0.3746386E 03
0.2499999E 01	0.3230845E 03	-0.3230845E 03	-0.1536845E 03	-0.3475352E 03
0.2999999E 01	0.2614775E 03	-0.2614775E 03	-0.1627748E 03	-0.3196613E 03
0.3499998E 01	0.2079037E 03	-0.2079037E 03	-0.1668047E 03	-0.2915469E 03
0.3999998E 01	0.1619632E 03	-0.1619632E 03	-0.1664359E 03	-0.2636138E 03
0.4499998E 01	0.1231859E 03	-0.1231859E 03	-0.1622746E 03	-0.2361861E 03
0.4999997E 01	0.9104577E 02	-0.9104577E 02	-0.1548709E 03	-0.2094984E 03
0.5499996E 01	0.6497612E 02	-0.6497612E 02	-0.1447204E 03	-0.1837061E 03
0.5999995E 01	0.4437843E 02	-0.4437843E 02	-0.1322669E 03	-0.1588940E 03
0.6499994E 01	0.2863200E 02	-0.2863200E 02	-0.1179051E 03	-0.1350842E 03
0.6999993E 01	0.1710128E 02	-0.1710128E 02	-0.1019855E 03	-0.1122463E 03
0.7499992E 01	0.9140792E 01	-0.9140792E 01	-0.8481892E 02	-0.9030340E 02
0.7999991E 01	0.4098398E 01	-0.4098398E 01	-0.6668203E 02	-0.6914106E 02
0.8499990E 01	0.1319466E 01	-0.1319466E 01	-0.4782296E 02	-0.4861464E 02
0.8999988E 01	0.1484786E 00	-0.1484786E 00	-0.2846648E 02	-0.2855557E 02
0.9499986E 01	-0.7324542E-01	0.7324542E-01	-0.8823308E 01	-0.8779361E 01
0.9999984E 01	-0.4225031E-03	0.4225031E-03	0.1090808E 02	0.1090833E 02

3 T,M,PASI 0.,36,1.

CSI	SXI	SXE	SFI	SFE
0.0000000E 00	0.4372529E 03	-0.2229672E 03	0.1739975E 03	-0.2406840E 02
0.1000000E 01	0.3353558E 03	-0.1210701E 03	0.1410384E 03	0.4110678E 01
0.2000000E 01	0.2522507E 03	-0.3796506E 02	0.1230103E 03	0.3594557E 02
0.3000000E 01	0.1870546E 03	0.2723109E 02	0.1162841E 03	0.6833708E 02
0.4000000E 01	0.1380855E 03	0.7620014E 02	0.1177129E 03	0.9914730E 02
0.5000000E 01	0.1032166E 03	0.1110690E 03	0.1246706E 03	0.1270263E 03
0.6000000E 01	0.8014089E 02	0.1341448E 03	0.1350474E 03	0.1512485E 03
0.7000000E 01	0.6656211E 02	0.1477236E 03	0.1472130E 03	0.1715614E 03
0.8000001E 01	0.6032113E 02	0.1539646E 03	0.1599634E 03	0.1880564E 03
0.9000001E 01	0.5947129E 02	0.1548144E 03	0.1724557E 03	0.2010586E 03
0.1000000E 02	0.6231349E 02	0.1519722E 03	0.1841399E 03	0.2110375E 03
0.1100000E 02	0.6740176E 02	0.1468839E 03	0.1946922E 03	0.2185369E 03
0.1200000E 02	0.7353115E 02	0.1407545E 03	0.2039533E 03	0.2241203E 03
0.1300000E 02	0.7970817E 02	0.1345775E 03	0.2118693E 03	0.2283302E 03
0.1400000E 02	0.8512269E 02	0.1291630E 03	0.2184445E 03	0.2316566E 03
0.1500000E 02	0.8911132E 02	0.1251743E 03	0.2236963E 03	0.2345152E 03
0.1600000E 02	0.9113328E 02	0.1231524E 03	0.2276224E 03	0.2372282E 03
0.1700000E 02	0.9074359E 02	0.1235421E 03	0.2301689E 03	0.2400085E 03
0.1800000E 02	0.8758674E 02	0.1266989E 03	0.2312129E 03	0.2429466E 03
0.1900000E 02	0.8139942E 02	0.1328862E 03	0.2305470E 03	0.2459930E 03
0.2000000E 02	0.7202832E 02	0.1422574E 03	0.2278727E 03	0.2489414E 03
0.2100000E 02	0.5945210E 02	0.1548336E 03	0.2228066E 03	0.2514211E 03
0.2200000E 02	0.4365775E 02	0.1704279E 03	0.2148966E 03	0.2528677E 03
0.2300000E 02	0.2567747E 02	0.1886082E 03	0.2036413E 03	0.2525205E 03
0.2400000E 02	0.5691559E 01	0.2085941E 03	0.1885456E 03	0.2494164E 03
0.2500000E 02	-0.1486837E 02	0.2291541E 03	0.1691713E 03	0.2423780E 03
0.2600000E 02	-0.3424695E 02	0.2485326E 03	0.1452194E 03	0.2300533E 03
0.2700000E 02	-0.5000089E 02	0.2642866E 03	0.1166498E 03	0.2109360E 03
0.2800000E 02	-0.5895676E 02	0.2732424E 03	0.8378701E 02	0.1834467E 03
0.2900000E 02	-0.5707511E 02	0.2713608E 03	0.4749316E 02	0.1460239E 03
0.3000000E 02	-0.3945731E 02	0.2537430E 03	0.9334167E 01	0.9729425E 02
0.3100000E 02	-0.3123322E 00	0.2145980E 03	-0.2822849E 02	0.3624460E 02
0.3200000E 02	0.6691171E 02	0.1473740E 03	-0.6161067E 02	-0.3747198E 02
0.3300000E 02	0.1693311E 03	0.4495462E 02	-0.8594320E 02	-0.1232561E 03
0.3400000E 02	0.3142727E 03	-0.9998704E 02	-0.9487529E 02	-0.2191531E 03
0.3500000E 02	0.5086033E 03	-0.2943176E 03	-0.8044740E 02	-0.3213236E 03

4 T,M,PASI 45.,21,0.5

Fig. 7.15

Scanned with OKEN Scanner

ITA	SRI	SRE	STI	STE
0.4500000E 02	0.2188610E 01	-0.1819670E 02	0.6017226E 02	0.2066865E 02
0.4550000E 02	0.2134050E 01	-0.1708375E 02	0.5932868E 02	0.2045383E 02
0.4599999E 02	0.2071609E 01	-0.1599720E 02	0.5850279E 02	0.2025564E 02
0.4649998E 02	0.2001719E 01	-0.1493608E 02	0.5769393E 02	0.2007326E 02
0.4699997E 02	0.1924798E 01	-0.1389941E 02	0.5690154E 02	0.1990591E 02
0.4749996E 02	0.1841241E 01	-0.1288623E 02	0.5612496E 02	0.1975287E 02
0.4799996E 02	0.1751415E 01	-0.1189568E 02	0.5536364E 02	0.1961346E 02
0.4849995E 02	0.1655674E 01	-0.1092694E 02	0.5461710E 02	0.1948700E 02
0.4899994E 02	0.1554337E 01	-0.9979187E 01	0.5388475E 02	0.1937291E 02
0.4949993E 02	0.1447718E 01	-0.9051670E 01	0.5316618E 02	0.1927059E 02
0.4999993E 02	0.1336116E 01	-0.8143684E 01	0.5246088E 02	0.1917951E 02
0.5049992E 02	0.1219803E 01	-0.7254508E 01	0.5176840E 02	0.1909912E 02
0.5099991E 02	0.1099045E 01	-0.6383502E 01	0.5108835E 02	0.1902893E 02
0.5149990E 02	0.9740878E 00	-0.5530068E 01	0.5042033E 02	0.1896847E 02
0.5199990E 02	0.8451660E 00	-0.4693559E 01	0.4976391E 02	0.1891730E 02
0.5249989E 02	0.7124992E 00	-0.3873429E 01	0.4911875E 02	0.1887501E 02
0.5299988E 02	0.5763064E 00	-0.3069147E 01	0.4848448E 02	0.1884117E 02
0.5349987E 02	0.4367777E 00	-0.2280164E 01	0.4786080E 02	0.1881541E 02
0.5399987E 02	0.2941069E 00	-0.1505988E 01	0.4724736E 02	0.1879735E 02
0.5449986E 02	0.1484736E 00	-0.7461706E 00	0.4664386E 02	0.1878666E 02
0.5499985E 02	0.4204430E-04	-0.2158516E-03	0.4604999E 02	0.1878302E 02

5 T,M,PASI 0.,51,1.

CSI	SXI	SXE	SFI	SFE
0.0000000E 00	0.2552371E 04	-0.2331349E 04	0.7843143E 03	-0.6808013E 03
0.1000000E 01	0.2043256E 04	-0.1822234E 04	0.4509158E 03	-0.7087312E 03
0.2000000E 01	0.1579031E 04	-0.1358009E 04	0.2093058E 03	-0.6718061E 03
0.3000000E 01	0.1173551E 04	-0.9525286E 03	0.4491204E 02	-0.5929117E 03
0.4000000E 01	0.8326958E 03	-0.6116734E 03	-0.5688079E 02	-0.4901914E 03
0.5000000E 01	0.5565594E 03	-0.3355370E 03	-0.1098318E 03	-0.3774607E 03
0.6000000E 01	0.3412776E 03	-0.1202552E 03	-0.1262799E 03	-0.2647398E 03
0.7000000E 01	0.1805317E 03	0.4049071E 02	-0.1168505E 03	-0.1588628E 03
0.8000001E 01	0.6670544E 02	0.1543169E 03	-0.9035545E 02	-0.6407199E 02
0.9000001E 01	-0.8235216E 01	0.2292576E 03	-0.5383467E 02	0.1741316E 02
0.1000000E 02	-0.5212323E 02	0.2731456E 03	-0.1269644E 02	0.8488420E 02
0.1100000E 02	-0.7217930E 02	0.2932017E 03	0.2909359E 02	0.1387078E 03
0.1200000E 02	-0.7476924E 02	0.2957916E 03	0.6879496E 02	0.1799632E 03
0.1300000E 02	-0.6528895E 02	0.2863114E 03	0.1046623E 03	0.2101424E 03
0.1400000E 02	-0.4814542E 02	0.2691678E 03	0.1357443E 03	0.2309382E 03
0.1500000E 02	-0.2680548E 02	0.2478279E 03	0.1616832E 03	0.2440732E 03
0.1600000E 02	-0.3881683E 01	0.2249041E 03	0.1825502E 03	0.2511859E 03
0.1700000E 02	0.1875453E 02	0.2022678E 03	0.1986995E 03	0.2537535E 03
0.1800000E 02	0.3982913E 02	0.1811932E 03	0.2106667E 03	0.2530759E 03
0.1900000E 02	0.5859935E 02	0.1624230E 03	0.2190762E 03	0.2502233E 03
0.2000000E 02	0.7467808E 02	0.1463443E 03	0.2245676E 03	0.2460675E 03
0.2100000E 02	0.8795857E 02	0.1330638E 03	0.2277581E 03	0.2412897E 03
0.2200000E 02	0.9855378E 02	0.1224686E 03	0.2292287E 03	0.2364032E 03
0.2300000E 02	0.1066914E 03	0.1143309E 03	0.2294645E 03	0.2317564E 03
0.2400000E 02	0.1126549E 03	0.1083674E 03	0.2288979E 03	0.2276116E 03
0.2500000E 02	0.1167466E 03	0.1042757E 03	0.2278377E 03	0.2240964E 03
0.2600000E 02	0.1192590E 03	0.1017633E 03	0.2265510E 03	0.2213023E 03
0.2700000E 02	0.1205016E 03	0.1005207E 03	0.2252247E 03	0.2192304E 03
0.2800000E 02	0.1207029E 03	0.1003194E 03	0.2240050E 03	0.2178900E 03
0.2900000E 02	0.1199972E 03	0.1010251E 03	0.2229422E 03	0.2172506E 03
0.3000000E 02	0.1184999E 03	0.1025224E 03	0.2219645E 03	0.2171712E 03
0.3100000E 02	0.1163029E 03	0.1047195E 03	0.2211489E 03	0.2176739E 03
0.3200000E 02	0.1134076E 03	0.1076148E 03	0.2203220E 03	0.2185842E 03
0.3300000E 02	0.1097585E 03	0.1112639E 03	0.2194168E 03	0.2198684E 03
0.3400000E 02	0.1056829E 03	0.1153394E 03	0.2182866E 03	0.2211836E 03

Fig. 7.16

Scanned with OKEN Scanner

0.3500000E 02	0.1006136E 03	0.1204088E 03	0.2166594E 03	0.2225979E 03
0.3600000E 02	0.9480661E 02	0.1262158E 03	0.2145141E 03	0.2239368E 03
0.3700000E 02	0.8836306E 02	0.1326593E 03	0.2114666E 03	0.2247555E 03
0.3800000E 02	0.8150816E 02	0.1395142E 03	0.2074942E 03	0.2248960E 03
0.3900000E 02	0.7444580E 02	0.1465766E 03	0.2020891E 03	0.2237283E 03
0.4000000E 02	0.6757670E 02	0.1534457E 03	0.1957764E 03	0.2215371E 03
0.4100000E 02	0.6165090E 02	0.1593715E 03	0.1876119E 03	0.2169281E 03
0.4200000E 02	0.5688828E 02	0.1641341E 03	0.1777027E 03	0.2098764E 03
0.4300000E 02	0.5559035E 02	0.1654320E 03	0.1667078E 03	0.1996603E 03
0.4400000E 02	0.5725354E 02	0.1637688E 03	0.1540740E 03	0.1860286E 03
0.4500000E 02	0.6615531E 02	0.1548671E 03	0.1420882E 03	0.1687018E 03
0.4600000E 02	0.8258445E 02	0.1384379E 03	0.1306576E 03	0.1474137E 03
0.4700000E 02	0.1088444E 03	0.1121779E 03	0.1208325E 03	0.1218325E 03
0.4800000E 02	0.1460659E 03	0.7495645E 02	0.1140146E 03	0.9268176E 02
0.4900000E 02	0.2004726E 03	0.2054980E 02	0.1142115E 03	0.6023477E 02
0.5000000E 02	0.2705466E 03	-0.4952420E 02	0.1221009E 03	0.2607975E 02

6 T,M,PASI 0.,16,3.

ITA	SRI	SRE	STI	STE
0.0000000E 00	0.1034372E 04	-0.9812202E 03	0.1034372E 04	-0.9812203E 03
0.3000000E 01	0.1028479E 04	-0.9753273E 03	0.1030979E 04	-0.9778272E 03
0.6000000E 01	0.1010800E 04	-0.9576489E 03	0.1020800E 04	-0.9676486E 03
0.9000001E 01	0.9813361E 03	-0.9281844E 03	0.1003836E 04	-0.9506845E 03
0.1200000E 02	0.9400863E 03	-0.8869345E 03	0.9800863E 03	-0.9269345E 03
0.1500000E 02	0.8870505E 03	-0.8338988E 03	0.9495506E 03	-0.8963989E 03
0.1800000E 02	0.8222291E 03	-0.7690773E 03	0.9122290E 03	-0.8590772E 03
0.2100000E 02	0.7456219E 03	-0.6924702E 03	0.8681220E 03	-0.8149703E 03
0.2400000E 02	0.6572292E 03	-0.6040775E 03	0.8172292E 03	-0.7640775E 03
0.2700000E 02	0.5570507E 03	-0.5038990E 03	0.7595506E 03	-0.7063989E 03
0.3000000E 02	0.4450864E 03	-0.3919347E 03	0.6950864E 03	-0.6419346E 03
0.3300000E 02	0.3213365E 03	-0.2681848E 03	0.6238364E 03	-0.5706846E 03
0.3600000E 02	0.1858006E 03	-0.1326489E 03	0.5458005E 03	-0.4926488E 03
0.3900000E 02	0.3847946E 02	0.1467223E 02	0.4609793E 03	-0.4078276E 03
0.4200000E 02	-0.1206277E 03	0.1737794E 03	0.3693721E 03	-0.3162204E 03
0.4500000E 02	-0.2915207E 03	0.3446724E 03	0.2709792E 03	-0.2178275E 03

7 T,M,PASI 45.,15,0.5

ITA	SRI	SRE	STI	STE
0.4500000E 02	-0.4933959E 02	0.4421805E 02	0.3436335E 03	-0.3079636E 03
0.4550000E 02	-0.4504510E 02	0.4036933E 02	0.3393390E 03	-0.3041149E 03
0.4599999E 02	-0.4088972E 02	0.3664529E 02	0.3351836E 03	-0.3003909E 03
0.4649998E 02	-0.3686770E 02	0.3304076E 02	0.3311616E 03	-0.2967864E 03
0.4699997E 02	-0.3297344E 02	0.2955074E 02	0.3272673E 03	-0.2932963E 03
0.4749996E 02	-0.2920143E 02	0.2617026E 02	0.3234953E 03	-0.2899159E 03
0.4799996E 02	-0.2554666E 02	0.2289487E 02	0.3198406E 03	-0.2866405E 03
0.4849995E 02	-0.2200440E 02	0.1972030E 02	0.3162983E 03	-0.2834660E 03
0.4899994E 02	-0.1856996E 02	0.1664237E 02	0.3128638E 03	-0.2803880E 03
0.4949993E 02	-0.1523910E 02	0.1365725E 02	0.3095330E 03	-0.2774028E 03
0.4999993E 02	-0.1200770E 02	0.1076128E 02	0.3063016E 03	-0.2745069E 03
0.5049992E 02	-0.8871747E 01	0.7950843E 01	0.3031657E 03	-0.2716965E 03
0.5099991E 02	-0.5827556E 01	0.5222647E 01	0.3001215E 03	-0.2689683E 03
0.5149990E 02	-0.2871699E 01	0.2573613E 01	0.2971656E 03	-0.2663192E 03
0.5199990E 02	-0.6030672E-03	0.5423842E-03	0.2942945E 03	-0.2637461E 03

Fig. 7.17

Scanned with OKEN Scanner

ELEMENTUL NR. 5 DE TIP CIS

CSI	SXI	SXIMIN	SXIMAX
		-0.747E 02	0.255E 04
0.000E 00	0.255E 04	I----------+	
0.100E 01	0.204E 04	I----------+	
0.200E 01	0.157E 04	I----------+	
0.300E 01	0.117E 04	I----------+	
0.400E 01	0.832E 03	I----------+	
0.500E 01	0.556E 03	I----------+	
0.600E 01	0.341E 03	I----------+	
0.700E 01	0.180E 03	I------+	
0.800E 01	0.667E 02	I-+	
0.900E 01	-0.823E 01	+	
0.100E 02	-0.521E 02	+-I	
0.110E 02	-0.721E 02	+--I	
0.120E 02	-0.747E 02	+--I	
0.130E 02	-0.652E 02	+--I	
0.140E 02	-0.481E 02	+-I	
0.150E 02	-0.268E 02	+I	
0.160E 02	-0.388E 01	+	
0.170E 02	0.187E 02	I+	
0.180E 02	0.398E 02	I+	
0.190E 02	0.585E 02	I-+	
0.200E 02	0.746E 02	I--+	
0.210E 02	0.879E 02	I--+	
0.220E 02	0.985E 02	I---+	
0.230E 02	0.106E 03	I---+	
0.240E 02	0.112E 03	I---+	
0.250E 02	0.116E 03	I---+	
0.260E 02	0.119E 03	I---+	
0.270E 02	0.120E 03	I---+	
0.280E 02	0.120E 03	I---+	
0.290E 02	0.119E 03	I---+	
0.300E 02	0.118E 03	I---+	
0.310E 02	0.116E 03	I---+	
0.320E 02	0.113E 03	I---+	
0.330E 02	0.109E 03	I---+	
0.340E 02	0.105E 03	I---+	
0.350E 02	0.100E 03	I---+	
0.360E 02	0.948E 02	I--+	
0.370E 02	0.883E 02	I--+	
0.380E 02	0.815E 02	I--+	
0.390E 02	0.744E 02	I--+	
0.400E 02	0.675E 02	I-+	
0.410E 02	0.616E 02	I-+	
0.420E 02	0.568E 02	I-+	
0.430E 02	0.555E 02	I-+	
0.440E 02	0.572E 02	I-+	
0.450E 02	0.661E 02	I-+	
0.460E 02	0.825E 02	I--+	
0.470E 02	-0.108E 03	I---+	
0.480E 02	0.146E 03	I----+	
0.490E 02	0.200E 03	I------+	
0.500E 02	0.270E 03	I---------+	

Fig. 7.18

Scanned with OKEN Scanner

astfel de soluţii să fie evitate pe cît posibil. De fapt ele sînt dezavantajoase şi din punctul de vedere al sudurii, ca urmare a necesităţii utilizării, pentru asamblare, a unor cordoane de sudură de colţ.

7.2.3. *Recipient pentru depozitarea unor fluide vîscoase (Structura 125)*

Recipientul pentru stocarea unor fluide vîscoase, a cărui schiţă este prezentată în figura 7.19, se compune dintr-o manta cilindrică lungă (elementul *1*), care este legată de conducta de evacuare (elementul *7*) printr-un înveliş conic (elementele *2* şi *3*). Utilajul se sprijină prin intermediul unei virole cilindrice (elementul *4*) şi a unei plăci inelare (elementele *5* şi *6*).

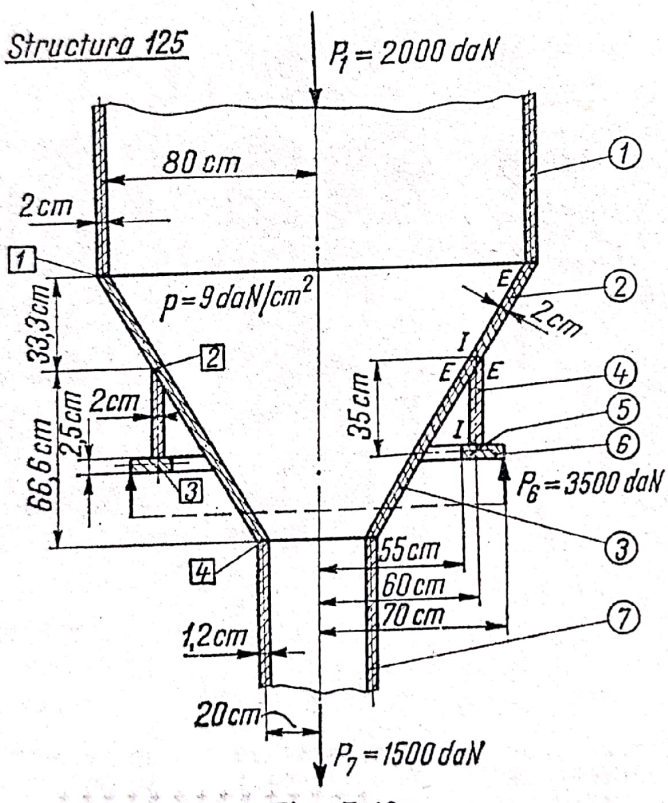


Fig. 7.19

S-au considerat ca sarcini presiunea interioară ($p = 9$ daN/cm^2) şi forţele axiale care reprezintă reacţiunile instalaţiei asupra structurii şi anume (fig. 7.19):

— forţa de compresiune de 2 000 daN din elementele *1* şi *2*;
— forţa de întindere de 1 500 daN din elementele *3* şi *7*;
— forţa de compresiune de 3 500 daN din elementele *4* şi *5*.

Pentru elementele *1* şi *7* ale structurii s-a considerat şi efectul axial al presiunii ca urmare a existenţei unor capace sau dispozitive

de închidere, ceea ce înseamnă că $c_p = 1$ în relaţia (2.63). Constantele elastice ale materialului s-au considerat $\mu = 0{,}3$; $E = 2{,}1$.

Lista completă a instrucţiunilor pentru descrierea structurii şi definirea datelor de intrare este reprodusă în figura 7.20, după care urmează şirurile de valori ale tensiunilor adimensionale funcţie de abscise metrice ; acestea se continuă în figurile 7.21—7.25.

Pentru a avea o imagine mai sugestivă a stării de tensiune în ansamblu, s-au trasat — cu valorile din figurile 7.20—7.25 — curbele de variaţie ale tensiunilor adimensionale longitudinale (fig. 7.26) şi circumferenţiale (fig. 7.27) de pe suprafeţele interioare ale structurii din figura 7.19.

Se constată valori mari ale tensiunilor adimensionale longitudinale la îmbinarea elementelor *1* şi *2* ale recipientului.

7.3. Calculul utilajelor încălzite neuniform

Încălzirea neuniformă pe care o suferă unele utilaje în exploatare poate duce la apariţia unor tensiuni cu valori apreciabile datorate faptului că, pe de o parte, structura fiind static nedeterminată dilatările termice ale elementelor nu sînt libere ci sînt parţial împiedicate, iar pe de altă parte, cîmpuri de temperatură neuniforme pe grosime sau în lungime duc la apariţia unor tensiuni suplimentare de „încovoiere", respectiv de „membrană".

Pentru utilajele ce se prezintă în cadrul acestui paragraf s-a considerat pe lîngă solicitările termice şi prezenţa unei presiuni interioare precum şi a unor forţe axiale suplimentare.

7.3.1. *Compensator pentru dilatări ale conductelor (Structura 132)*

Pentru compensarea dilatărilor conductelor, produse de variaţii ale temperaturii mediului ambiant sau ale fluidului care circulă prin acestea, se utilizează diverse tipuri de compensatoare. Unul din acestea este prezentat în figura 7.28. Pentru compensarea unor dilatări mari se pot utiliza mai multe astfel de ansamble montate în serie.

Compensatorul avînd un plan de simetrie, este suficient pentru calcul să se considere numai jumătate din ansamblu (desenat cu linie continuă în fig. 7.28). Elementele structurii sau numerotat astfel : conducta —*1* şi *2* ; placa inelară —*3* ; mantaua cilindrică—*4* şi *5*.

Scanned with OKEN Scanner

```
* STRUCTURA NR. 125
  ELEMENTE
1 CIL 1X
2 CON 11X
3 CON 11X
4 CIS 11
5 PLI 01
6 PLI 10
7 CIL X1
  LEGATURI
1 1,2E
2 4E,2I,3E
3 4I,5,6
4 7,3I
* DATE METRIC   (CM SI DAN)
CONSTANTE 1=0.3,3=2.1
1 5=80.,6=2.,10=9.,11=-2000.,13=1.
2 5=80.,6=2.,7=60.,8=1.030372,10=9.,11=-2000.
3 5=60.,6=2.,7=20.,8=1.030372,10=9.,11=1500.
4 5=60.,6=2.,7=35.,11=-3500.
5 5=60.,6=2.5,7=55.
6 5=70.,6=2.5,7=60.,11=3500.
7 5=20.,6=1.2,10=9.,11=1500.,13=1.
* REZOLVA

**ATOL= 2

1 T,M,PAST 0.,41,5.
```

CSI	SXI	SXE	SFI	SFE
0.0000000E 00	0.4523820E 03	-0.2828481E 03	0.6637393E 02	-0.1541950E 03
0.5000000E 01	0.1635518E 03	0.5981980E 01	0.2261135E 02	-0.2465960E 02
0.1000000E 02	0.3452630E 02	0.1350075E 03	0.5300878E 02	0.8315315E 02
0.1500000E 02	0.3433258E 01	0.1661006E 03	0.1008050E 03	0.1496052E 03
0.2000000E 02	0.1744925E 02	0.1520846E 03	0.1400486E 03	0.1804392E 03
0.2500000E 02	0.4343640E 02	0.1260954E 03	0.1640033E 03	0.1888004E 03
0.3000000E 02	0.6568652E 02	0.1038473E 03	0.1749812E 03	0.1864294E 03
0.3500000E 02	0.7966793E 02	0.8986592E 02	0.1778509E 03	0.1809103E 03
0.4000000E 02	0.8631301E 02	0.8322084E 02	0.1768942E 03	0.1759666E 03
0.4500000E 02	0.8823794E 02	0.8129591E 02	0.1748497E 03	0.1727671E 03
0.5000000E 02	0.8785624E 02	0.8167761E 02	0.1730467E 03	0.1711931E 03
0.5500000E 02	0.8675822E 02	0.8277563E 02	0.1718912E 03	0.1706965E 03
0.6000000E 02	0.8574208E 02	0.8379177E 02	0.1713293E 03	0.1707442E 03
0.6500001E 02	0.8507127E 02	0.8446258E 02	0.1711567E 03	0.1709740E 03
0.7000001E 02	0.8473391E 02	0.8479994E 02	0.1711787E 03	0.1711985E 03
0.7500001E 02	0.8462205E 02	0.8491180E 02	0.1712642E 03	0.1713511E 03
0.8000001E 02	0.8462658E 02	0.8490727E 02	0.1713462E 03	0.1714305E 03
0.8500001E 02	0.8467182E 02	0.8486203E 02	0.1714015E 03	0.1714586E 03
0.9000001E 02	0.8471775E 02	0.8481610E 02	0.1714299E 03	0.1714594E 03
0.9500001E 02	0.8474964E 02	0.8478421E 02	0.1714397E 03	0.1714501E 03
0.1000000E 03	0.8476657E 02	0.8476728E 02	0.1714398E 03	0.1714400E 03
0.1050000E 03	0.8477281E 02	0.8476104E 02	0.1714363E 03	0.1714328E 03
0.1100000E 03	0.8477323E 02	0.8476062E 02	0.1714326E 03	0.1714288E 03
0.1150000E 03	0.8477143E 02	0.8476242E 02	0.1714300E 03	0.1714273E 03
0.1200000E 03	0.8476937E 02	0.8476448E 02	0.1714286E 03	0.1714271E 03
0.1250000E 03	0.8476788E 02	0.8476597E 02	0.1714280E 03	0.1714275E 03
0.1300000E 03	0.8476704E 02	0.8476681E 02	0.1714280E 03	0.1714279E 03
0.1350000E 03	0.8476669E 02	0.8476716E 02	0.1714281E 03	0.1714283E 03
0.1400000E 03	0.8476664E 02	0.8476721E 02	0.1714283E 03	0.1714285E 03
0.1450000E 03	0.8476672E 02	0.8476713E 02	0.1714284E 03	0.1714285E 03
0.1500000E 03	0.8476681E 02	0.8476704E 02	0.1714285E 03	0.1714285E 03
0.1550000E 03	0.8476687E 02	0.8476698E 02	0.1714285E 03	0.1714286E 03

Fig. 7.20

Scanned with OKEN Scanner

0.1600000E 03	0.8476692E 02	0.8476693E 02	0.1714285E 03	0.1714285E 03
0.1650000E 03	0.8476693E 02	0.8476692E 02	0.1714285E 03	0.1714285E 03
0.1700000E 03	0.8476693E 02	0.8476692E 02	0.1714285E 03	0.1714285E 03
0.1750000E 03	0.8476693E 02	0.8476692E 02	0.1714285E 03	0.1714285E 03
0.1800000E 03	0.8476693E 02	0.8476692E 02	0.1714285E 03	0.1714285E 03
0.1850000E 03	0.8476693E 02	0.8476692E 02	0.1714285E 03	0.1714285E 03
0.1900000E 03	0.8476693E 02	0.8476692E 02	0.1714285E 03	0.1714285E 03
0.1950000E 03	0.8476692E 02	0.8476693E 02	0.1714285E 03	0.1714285E 03
0.2000000E 03	0.8476692E 02	0.8476693E 02	0.1714285E 03	0.1714285E 03

2 T,M,PASI 0.,34,1.

CSI	SXI	SXE	SPI	SPE
0.0000000E 00	0.1027135E 03	0.4873789E 02	0.1362174E 03	0.1146601E 03
0.1000000E 01	0.9169030E 02	0.6071817E 02	0.1379858E 03	0.1228880E 03
0.2000000E 01	0.8211376E 02	0.7133760E 02	0.1402403E 03	0.1309869E 03
0.3000000E 01	0.7373967E 02	0.8083975E 02	0.1427454E 03	0.1388332E 03
0.4000000E 01	0.6633023E 02	0.8945851E 02	0.1452926E 03	0.1463312E 03
0.5000000E 01	0.5966509E 02	0.9740763E 02	0.1476965E 03	0.1534025E 03
0.6000000E 01	0.5354461E 02	0.1048781E 03	0.1497941E 03	0.1599827E 03
0.7000000E 01	0.4779821E 02	0.1120304E 03	0.1514411E 03	0.1660124E 03
0.8000001E 01	0.4228669E 02	0.1189920E 03	0.1525112E 03	0.1714345E 03
0.9000001E 01	0.3690700E 02	0.1258533E 03	0.1528944E 03	0.1761890E 03
0.1000000E 02	0.3159479E 02	0.1326651E 03	0.1524970E 03	0.1802102E 03
0.1100000E 02	0.2632614E 02	0.1394369E 03	0.1512405E 03	0.1834248E 03
0.1200000E 02	0.2112102E 02	0.1461339E 03	0.1490632E 03	0.1857502E 03
0.1300000E 02	0.1604460E 02	0.1526753E 03	0.1459211E 03	0.1870936E 03
0.1400000E 02	0.1120756E 02	0.1589346E 03	0.1417886E 03	0.1873529E 03
0.1500000E 02	0.6769764E 01	0.1647355E 03	0.1366625E 03	0.1864168E 03
0.1600000E 02	0.2939453E 01	0.1698534E 03	0.1305644E 03	0.1841672E 03
0.1700000E 02	-0.2702713E-01	0.1740153E 03	0.1235420E 03	0.1804805E 03
0.1800000E 02	-0.1822841E 01	0.1768982E 03	0.1156766E 03	0.1752332E 03
0.1900000E 02	-0.2094448E 01	0.1781325E 03	0.1070830E 03	0.1683029E 03
0.2000000E 02	-0.4412651E 00	0.1773024E 03	0.9791630E 02	0.1595750E 03
0.2100000E 02	0.3580505E 01	0.1739501E 03	0.8837625E 02	0.1489493E 03
0.2200000E 02	0.1045484E 02	0.1675788E 03	0.7870884E 02	0.1363425E 03
0.2300000E 02	0.2069929E 02	0.1576603E 03	0.6921446E 02	0.1217005E 03
0.2400000E 02	0.3485949E 02	0.1436410E 03	0.6024845E 02	0.1050022E 03
0.2500000E 02	0.5349983E 02	0.1249513E 03	0.5222525E 02	0.8626950E 02
0.2600000E 02	0.7719238E 02	0.1010180E 03	0.4562225E 02	0.6557780E 02
0.2700000E 02	0.1065077E 03	0.7127351E 02	0.4097866E 02	0.4306091E 02
0.2800000E 02	0.1419952E 03	0.3517707E 02	0.3889962E 02	0.1892791E 02
0.2900000E 02	0.1841667E 03	-0.7768754E 01	0.4005289E 02	-0.6530040E 01
0.3000000E 02	0.2334847E 03	-0.5800520E 02	0.4516722E 02	-0.3293296E 02
0.3100000E 02	0.2903287E 03	-0.1158827E 03	0.5502861E 02	-0.5979420E 02
0.3200000E 02	0.3549752E 03	-0.1816403E 03	0.7047236E 02	-0.8651472E 02
0.3300000E 02	0.4275808E 03	-0.2553879E 03	0.9237808E 02	-0.1123770E 03

3 T,M,PASI 0.,61,1.111111

CSI	SXI	SXE	SPI	SPE
0.0000000E 00	-0.4038319E 01	0.4927792E 02	0.8525564E 02	0.1066770E 03
0.1111111E 01	0.2140602E 02	0.2911872E 02	0.8454788E 02	0.9318550E 02
0.2222222E 01	0.3747502E 02	0.1743849E 02	0.8187805E 02	0.8193262E 02
0.3333333E 01	0.4669540E 02	0.1181345E 02	0.7850375E 02	0.7299525E 02
0.4444443E 01	0.5116812E 02	0.1028500E 02	0.7519804E 02	0.6662100E 02
0.5555554E 01	0.5254140E 02	0.1135139E 02	0.7238993E 02	0.6243273E 02
0.6666665E 01	0.5204666E 02	0.1391342E 02	0.7027624E 02	0.6006034E 02

Fig. 7.21

Scanned with OKEN Scanner

0.7777775E 01	0.5056258E 02	0.1720314E 02	0.6890525E 02	0.5911986E 02
0.8888887E 01	0.4868609E 02	0.2071114E 02	0.6823783E 02	0.5925783E 02
0.9999998E 01	0.4679920E 02	0.2412154E 02	0.6818865E 02	0.6017133E 02
0.1111110E 02	0.4512694E 02	0.2725715E 02	0.6865425E 02	0.6161467E 02
0.1222221E 02	0.4378440E 02	0.3003610E 02	0.6952984E 02	0.6339711E 02
0.1333333E 02	0.4281329E 02	0.3243854E 02	0.7071914E 02	0.6537648E 02
0.1444444E 02	0.4220901E 02	0.3448246E 02	0.7213917E 02	0.6745129E 02
0.1555555E 02	0.4194060E 02	0.3620632E 02	0.7372186E 02	0.6955256E 02
0.1666666E 02	0.4196391E 02	0.3765767E 02	0.7541363E 02	0.7163624E 02
0.1777777E 02	0.4223069E 02	0.3888549E 02	0.7717395E 02	0.7367677E 02
0.1888888E 02	0.4269390E 02	0.3993592E 02	0.7897367E 02	0.7566198E 02
0.1999999E 02	0.4331085E 02	0.4084998E 02	0.8079272E 02	0.7758888E 02
0.2111110E 02	0.4404441E 02	0.4166264E 02	0.8261825E 02	0.7946043E 02
0.2222221E 02	0.4486347E 02	0.4240299E 02	0.8444299E 02	0.8128343E 02
0.2333332E 02	0.4574234E 02	0.4309475E 02	0.8626348E 02	0.8306675E 02
0.2444443E 02	0.4666008E 02	0.4375714E 02	0.8807907E 02	0.8482023E 02
0.2555554E 02	0.4759954E 02	0.4440602E 02	0.8989065E 02	0.8655397E 02
0.2666666E 02	0.4854637E 02	0.4505467E 02	0.9169989E 02	0.8827784E 02
0.2777777E 02	0.4948808E 02	0.4571483E 02	0.9350842E 02	0.9000108E 02
0.2888888E 02	0.5041335E 02	0.4639744E 02	0.9531745E 02	0.9173223E 02
0.2999999E 02	0.5131120E 02	0.4711310E 02	0.9712702E 02	0.9347882E 02
0.3111110E 02	0.5217065E 02	0.4787265E 02	0.9893583E 02	0.9524725E 02
0.3222221E 02	0.5298048E 02	0.4868741E 02	0.1007408E 03	0.9704274E 02
0.3333332E 02	0.5372888E 02	0.4956906E 02	0.1025368E 03	0.9886878E 02
0.3444442E 02	0.5440378E 02	0.5052963E 02	0.1043167E 03	0.1007273E 03
0.3555553E 02	0.5499307E 02	0.5158116E 02	0.1060707E 03	0.1026178E 03
0.3666664E 02	0.5548498E 02	0.5273513E 02	0.1077870E 03	0.1045378E 03
0.3777774E 02	0.5586890E 02	0.5400163E 02	0.1094512E 03	0.1064813E 03
0.3888885E 02	0.5613610E 02	0.5538864E 02	0.1110472E 03	0.1084397E 03
0.3999996E 02	0.5628086E 02	0.5690073E 02	0.1125568E 03	0.1104003E 03
0.4111106E 02	0.5630174E 02	0.5853794E 02	0.1139605E 03	0.1123464E 03
0.4222217E 02	0.5620275E 02	0.6029428E 02	0.1152384E 03	0.1142573E 03
0.4333328E 02	0.5599501E 02	0.6215635E 02	0.1163704E 03	0.1161074E 03
0.4444438E 02	0.5569824E 02	0.6410166E 02	0.1173380E 03	0.1178668E 03
0.4555549E 02	0.5534219E 02	0.6609713E 02	0.1181251E 03	0.1195013E 03
0.4666660E 02	0.5496846E 02	0.6809748E 02	0.1187194E 03	0.1209723E 03
0.4777771E 02	0.5463158E 02	0.7004406E 02	0.1191146E 03	0.1222382E 03
0.4888881E 02	0.5440048E 02	0.7186347E 02	0.1193118E 03	0.1232547E 03
0.4999992E 02	0.5435930E 02	0.7346696E 02	0.1193217E 03	0.1239764E 03
0.5111103E 02	0.5460787E 02	0.7474989E 02	0.1191669E 03	0.1243586E 03
0.5222213E 02	0.5526170E 02	0.7559207E 02	0.1188839E 03	0.1243592E 03
0.5333324E 02	0.5645133E 02	0.7585964E 02	0.1185260E 03	0.1239413E 03
0.5444435E 02	0.5832069E 02	0.7540179E 02	0.1181644E 03	0.1230763E 03
0.5555545E 02	0.6102482E 02	0.7406359E 02	0.1178914E 03	0.1217473E 03
0.5666656E 02	0.6472615E 02	0.7167974E 02	0.1178211E 03	0.1199528E 03
0.5777767E 02	0.6959010E 02	0.6808471E 02	0.1180911E 03	0.1177113E 03
0.5888877E 02	0.7577873E 02	0.6311812E 02	0.1188631E 03	0.1150654E 03
0.5999988E 02	0.8344375E 02	0.5663243E 02	0.1203225E 03	0.1120866E 03
0.6111099E 02	0.9271704E 02	0.4850269E 02	0.1226777E 03	0.1088805E 03
0.6222209E 02	0.1037009E 03	0.3863690E 02	0.1261574E 03	0.1055910E 03
0.6333320E 02	0.1164567E 03	0.2698756E 02	0.1310079E 03	0.1024044E 03
0.6444432E 02	0.1309698E 03	0.1356749E 02	0.1374866E 03	0.9955467E 02
0.6555542E 02	0.1472375E 03	-0.1538257E 01	0.1458570E 03	0.9732504E 02
0.6666651E 02	0.1650525E 03	-0.1815505E 02	0.1563789E 03	0.9605116E 02

4 T,M,PASI 0.,36,1.

CSI	SXI	SXE	SFI	SFE
0.0000000E 00	0.6002548E 02	-0.6444645E 02	0.1894886E 02	-0.1839270E 02
0.1000000E 01	0.5301286E 02	-0.5743383E 02	0.1278137E 02	-0.2035262E 02
0.2000000E 01	0.4618601E 02	-0.5060698E 02	0.7507406E 01	-0.2153048E 02
0.3000000E 01	0.3970673E 02	-0.4412770E 02	0.3072155E 01	-0.2207816E 02

Fig. 7.22

Scanned with OKEN Scanner

0.4000000E 01	0.3369992E 02	-0.3812088E 02	-0.5850045E 00	-0.2213124E 02
0.5000000E 01	0.2825877E 02	-0.3267974E 02	-0.3527110E 01	-0.2180866E 02
0.6000000E 01	0.2344905E 02	-0.2787002E 02	-0.5816872E 01	-0.2121259E 02
0.7000000E 01	0.1931346E 02	-0.2373443E 02	-0.7514370E 01	-0.2042874E 02
0.8000001E 01	0.1587510E 02	-0.2029607E 02	-0.8675371E 01	-0.1952672E 02
0.9000001E 01	0.1314062E 02	-0.1756159E 02	-0.9350011E 01	-0.1856067E 02
0.1000000E 02	0.1110295E 02	-0.1552392E 02	-0.9581922E 01	-0.1756998E 02
0.1100000E 02	0.9743268E 01	-0.1416423E 02	-0.9407653E 01	-0.1657990E 02
0.1200000E 02	0.9032474E 01	-0.1345344E 02	-0.8856580E 01	-0.1560235E 02
0.1300000E 02	0.8932462E 01	-0.1335343E 02	-0.7951000E 01	-0.1463676E 02
0.1400000E 02	0.9396427E 01	-0.1381739E 02	-0.6706511E 01	-0.1367065E 02
0.1500000E 02	0.1036907E 02	-0.1479004E 02	-0.5132730E 01	-0.1268046E 02
0.1600000E 02	0.1178629E 02	-0.1620727E 02	-0.3234215E 01	-0.1163228E 02
0.1700000E 02	0.1357427E 02	-0.1799524E 02	-0.1011730E 01	-0.1048258E 02
0.1800000E 02	0.1564862E 02	-0.2006959E 02	0.1536428E 01	-0.9179035E 01
0.1900000E 02	0.1791284E 02	-0.2233381E 02	0.4412622E 01	-0.7661370E 01
0.2000000E 02	0.2025703E 02	-0.2467800E 02	0.7618148E 01	-0.5862361E 01
0.2100000E 02	0.2255596E 02	-0.2697694E 02	0.1115079E 02	-0.3709076E 01
0.2200000E 02	0.2466733E 02	-0.2908830E 02	0.1500256E 02	-0.1124121E 01
0.2300000E 02	0.2642995E 02	-0.3085092E 02	0.1915692E 02	0.1972863E 01
0.2400000E 02	0.2766239E 02	-0.3208336E 02	0.2358590E 02	0.5662178E 01
0.2500000E 02	0.2816196E 02	-0.3258293E 02	0.2824719E 02	0.1002373E 02
0.2600000E 02	0.2770273E 02	-0.3212370E 02	0.3308034E 02	0.1513241E 02
0.2700000E 02	0.2603645E 02	-0.3045742E 02	0.3800344E 02	0.2105529E 02
0.2800000E 02	0.2289174E 02	-0.2731271E 02	0.4290962E 02	0.2784828E 02
0.2900000E 02	0.1797661E 02	-0.2239759E 02	0.4766313E 02	0.3555088E 02
0.3000000E 02	0.1097983E 02	-0.1540080E 02	0.5209559E 02	0.4418140E 02
0.3100000E 02	0.1575169E 01	-0.5996141E 01	0.5600287E 02	0.5373148E 02
0.3200000E 02	-0.1057299E 02	0.6152024E 01	0.5914096E 02	0.6415847E 02
0.3300000E 02	-0.2580287E 02	0.2138190E 02	0.6122378E 02	0.7537922E 02
0.3400000E 02	-0.4444664E 02	0.4002568E 02	0.6192028E 02	0.8726197E 02
0.3500000E 02	-0.6681716E 02	0.6239619E 02	0.6085356E 02	0.9961755E 02

5 T,M,PASI 55.,26,0.2

ITA	SRI	SRE	STI	STE
0.5500000E 02	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.2809027E 02	0.1548711E 02
0.5520000E 02	0.1015837E 00	0.5600653E-01	0.2798869E 02	0.1543110E 02
0.5540000E 02	0.2020762E 00	0.1114114E 00	0.2788820E 02	0.1537570E 02
0.5559999E 02	0.3014897E 00	0.1662214E 00	0.2778878E 02	0.1532088E 02
0.5579999E 02	0.3998331E 00	0.2204414E 00	0.2769044E 02	0.1526667E 02
0.5599999E 02	0.4971188E 00	0.2740784E 00	0.2759316E 02	0.1521303E 02
0.5619998E 02	0.5933742E 00	0.3271471E 00	0.2749690E 02	0.1515996E 02
0.5639998E 02	0.6886076E 00	0.3796526E 00	0.2740167E 02	0.1510746E 02
0.5659998E 02	0.7828336E 00	0.4316024E 00	0.2730744E 02	0.1505551E 02
0.5679996E 02	0.8760662E 00	0.4830046E 00	0.2721421E 02	0.1500410E 02
0.5699997E 02	0.9683105E 00	0.5338622E 00	0.2712197E 02	0.1495325E 02
0.5719997E 02	0.1059597E 01	0.5841918E 00	0.2703068E 02	0.1490292E 02
0.5739997E 02	0.1149933E 01	0.6339968E 00	0.2694034E 02	0.1485312E 02
0.5759996E 02	0.1239326E 01	0.6832822E 00	0.2685095E 02	0.1480383E 02
0.5779996E 02	0.1327790E 01	0.7320553E 00	0.2676248E 02	0.1475506E 02
0.5799996E 02	0.1415344E 01	0.7803267E 00	0.2667493E 02	0.1470678E 02
0.5819995E 02	0.1501996E 01	0.8281015E 00	0.2658828E 02	0.1465901E 02
0.5839995E 02	0.1587761E 01	0.8753861E 00	0.2650251E 02	0.1461172E 02
0.5859995E 02	0.1672651E 01	0.9221891E 00	0.2641762E 02	0.1456492E 02
0.5879994E 02	0.1756667E 01	0.9685094E 00	0.2633361E 02	0.1451860E 02
0.5899994E 02	0.1839838E 01	0.1014364E 01	0.2625044E 02	0.1447274E 02
0.5919994E 02	0.1922167E 01	0.1059755E 01	0.2616811E 02	0.1442735E 02
0.5939994E 02	0.2003666E 01	0.1104688E 01	0.2608661E 02	0.1438242E 02
0.5959993E 02	0.2084342E 01	0.1149167E 01	0.2600593E 02	0.1433794E 02
0.5979993E 02	0.2164211E 01	0.1193202E 01	0.2592606E 02	0.1429391E 02
0.5999993E 02	0.2243287E 01	0.1236799E 01	0.2584699E 02	0.1425031E 02

Fig. 7.23

Scanned with OKEN Scanner

```
6 T,M,PASI 60.,41,0.25
```

ITA	SRI	SRE	STI	STE
0.6000000E 02	0.4019663E 02	-0.4047190E 02	0.1864772E 02	-0.1684785E 02
0.6025000E 02	0.3905020E 02	-0.3931689E 02	0.1841770E 02	-0.1662643E 02
0.6049999E 02	0.3791220E 02	-0.3817041E 02	0.1818497E 02	-0.1640218E 02
0.6074998E 02	0.3678263E 02	-0.3703244E 02	0.1794946E 02	-0.1617505E 02
0.6099997E 02	0.3566140E 02	-0.3590294E 02	0.1771126E 02	-0.1594512E 02
0.6124996E 02	0.3454827E 02	-0.3478163E 02	0.1747042E 02	-0.1571247E 02
0.6149996E 02	0.3344322E 02	-0.3366850E 02	0.1722713E 02	-0.1547726E 02
0.6174995E 02	0.3234613E 02	-0.3256343E 02	0.1698118E 02	-0.1523928E 02
0.6199994E 02	0.3125696E 02	-0.3146637E 02	0.1673294E 02	-0.1499893E 02
0.6224993E 02	0.3017545E 02	-0.3037708E 02	0.1648226E 02	-0.1475603E 02
0.6249993E 02	0.2910160E 02	-0.2929552E 02	0.1622940E 02	-0.1451087E 02
0.6274992E 02	0.2803528E 02	-0.2822161E 02	0.1597418E 02	-0.1426325E 02
0.6299991E 02	0.2697647E 02	-0.2715528E 02	0.1571683E 02	-0.1401342E 02
0.6324990E 02	0.2592495E 02	-0.2609634E 02	0.1545725E 02	-0.1376126E 02
0.6349990E 02	0.2488070E 02	-0.2504475E 02	0.1519563E 02	-0.1350698E 02
0.6374989E 02	0.2384360E 02	-0.2400040E 02	0.1493204E 02	-0.1325064E 02
0.6399988E 02	0.2281362E 02	-0.2296326E 02	0.1466637E 02	-0.1299214E 02
0.6424987E 02	0.2179063E 02	-0.2193318E 02	0.1439885E 02	-0.1273170E 02
0.6449986E 02	0.2077445E 02	-0.2091000E 02	0.1412948E 02	-0.1246933E 02
0.6474984E 02	0.1976515E 02	-0.1989378E 02	0.1385822E 02	-0.1220499E 02
0.6499983E 02	0.1876256E 02	-0.1888436E 02	0.1358517E 02	-0.1193878E 02
0.6524981E 02	0.1776660E 02	-0.1788163E 02	0.1331050E 02	-0.1167087E 02
0.6549980E 02	0.1677720E 02	-0.1688555E 02	0.1303399E 02	-0.1140105E 02
0.6574978E 02	0.1579420E 02	-0.1589594E 02	0.1275586E 02	-0.1112952E 02
0.6599977E 02	0.1481766E 02	-0.1491287E 02	0.1247624E 02	-0.1085643E 02
0.6624975E 02	0.1384742E 02	-0.1393617E 02	0.1219493E 02	-0.1058159E 02
0.6649974E 02	0.1288342E 02	-0.1296578E 02	0.1191221E 02	-0.1030525E 02
0.6674972E 02	0.1192557E 02	-0.1200162E 02	0.1162793E 02	-0.1002729E 02
0.6699971E 02	0.1097376E 02	-0.1104356E 02	0.1134221E 02	-0.9747814E 01
0.6724969E 02	0.1002802E 02	-0.1009165E 02	0.1105507E 02	-0.9466854E 01
0.6749967E 02	0.9088214E 01	-0.9145734E 01	0.1076659E 02	-0.9184480E 01
0.6774966E 02	0.8154275E 01	-0.8205757E 01	0.1047684E 02	-0.8900768E 01
0.6799964E 02	0.7226134E 01	-0.7271642E 01	0.1018579E 02	-0.8615682E 01
0.6824963E 02	0.6303676E 01	-0.6343277E 01	0.9893362E 01	-0.8329162E 01
0.6849961E 02	0.5386936E 01	-0.5420695E 01	0.9599784E 01	-0.8041425E 01
0.6874960E 02	0.4475781E 01	-0.4503763E 01	0.9305076E 01	-0.7752496E 01
0.6899958E 02	0.3570170E 01	-0.3592436E 01	0.9009128E 01	-0.7462265E 01
0.6924957E 02	0.2670021E 01	-0.2686633E 01	0.8712121E 01	-0.7170911E 01
0.6949955E 02	0.1775220E 01	-0.1786238E 01	0.8413991E 01	-0.6878376E 01
0.6974954E 02	0.8858299E 00	-0.8913146E 00	0.8114749E 01	-0.6584667E 01
0.6999952E 02	0.1707823E-02	-0.1718446E-02	0.7814527E 01	-0.6289919E 01

```
7 T,M,PASI 0.,41,1.
```

CSI	SXI	SXE	SFI	SFE
0.0000000E 00	-0.3359929E 02	0.1145014E 03	0.6989830E 02	0.1143284E 03
0.1000000E 01	-0.7066773E 01	0.8796888E 02	0.8067700E 02	0.1091876E 03
0.2000000E 01	0.1366517E 02	0.6723693E 02	0.8607516E 02	0.1021466E 03
0.3000000E 01	0.2876915E 02	0.5213294E 02	0.8771794E 02	0.9472708E 02
0.4000000E 01	0.3894337E 02	0.4195873E 02	0.8696467E 02	0.8786927E 02
0.5000000E 01	0.4512308E 02	0.3577902E 02	0.8487348E 02	0.8207026E 02
0.6000000E 01	0.4828475E 02	0.3261735E 02	0.8221214E 02	0.7751193E 02
0.7000000E 01	0.4932579E 02	0.3157631E 02	0.7949531E 02	0.7417047E 02
0.8000001E 01	0.4900180E 02	0.3190030E 02	0.7703338E 02	0.7190293E 02

Fig. 7.24

Scanned with OKEN Scanner

0.9000001E 01	0.4790446E 02	0.3299765E 02	0.7498306E 02	0.7051101E 02
0.1000000E 02	0.4646574E 02	0.3443636E 02	0.7339341E 02	0.6978460E 02
0.1100000E 02	0.4497742E 02	0.3592468E 02	0.7224473E 02	0.6952891E 02
0.1200000E 02	0.4361738E 02	0.3728472E 02	0.7147862E 02	0.6957882E 02
0.1300000E 02	0.4247730E 02	0.3842481E 02	0.7102001E 02	0.6980427E 02
0.1400000E 02	0.4158810E 02	0.3931400E 02	0.7079194E 02	0.7010971E 02
0.1500000E 02	0.4094155E 02	0.3996055E 02	0.7072441E 02	0.7043011E 02
0.1600000E 02	0.4050703E 02	0.4039507E 02	0.7075904E 02	0.7072546E 02
0.1700000E 02	0.4024400E 02	0.4065810E 02	0.7085044E 02	0.7097468E 02
0.1800000E 02	0.4011029E 02	0.4079180E 02	0.7096575E 02	0.7117021E 02
0.1900000E 02	0.4006727E 02	0.4083483E 02	0.7108300E 02	0.7131327E 02
0.2000000E 02	0.4008247E 02	0.4081963E 02	0.7118899E 02	0.7141014E 02
0.2100000E 02	0.4013050E 02	0.4077160E 02	0.7127708E 02	0.7146942E 02
0.2200000E 02	0.4019286E 02	0.4070924E 02	0.7134524E 02	0.7150016E 02
0.2300000E 02	0.4025711E 02	0.4064498E 02	0.7139440E 02	0.7151077E 02
0.2400000E 02	0.4031567E 02	0.4058643E 02	0.7142710E 02	0.7150833E 02
0.2500000E 02	0.4036466E 02	0.4053744E 02	0.7144662E 02	0.7149845E 02
0.2600000E 02	0.4040279E 02	0.4049931E 02	0.7145625E 02	0.7148521E 02
0.2700000E 02	0.4043047E 02	0.4047163E 02	0.7145903E 02	0.7147137E 02
0.2800000E 02	0.4044902E 02	0.4045307E 02	0.7145744E 02	0.7145866E 02
0.2900000E 02	0.4046022E 02	0.4044188E 02	0.7145344E 02	0.7144795E 02
0.3000000E 02	0.4046466E 02	0.4043623E 02	0.7144845E 02	0.7143956E 02
0.3100000E 02	0.4046765E 02	0.4043445E 02	0.7144339E 02	0.7143342E 02
0.3200000E 02	0.4046694E 02	0.4043516E 02	0.7143882E 02	0.7142929E 02
0.3300000E 02	0.4046483E 02	0.4043727E 02	0.7143504E 02	0.7142677E 02
0.3400000E 02	0.4046213E 02	0.4043997E 02	0.7143212E 02	0.7142547E 02
0.3500000E 02	0.4045936E 02	0.4044274E 02	0.7143002E 02	0.7142503E 02
0.3600000E 02	0.4045684E 02	0.4044526E 02	0.7142861E 02	0.7142515E 02
0.3700000E 02	0.4045473E 02	0.4044737E 02	0.7142779E 02	0.7142558E 02
0.3800000E 02	0.4045310E 02	0.4044900E 02	0.7142738E 02	0.7142616E 02
0.3900000E 02	0.4045191E 02	0.4045018E 02	0.7142727E 02	0.7142675E 02
0.4000000E 02	0.4045112E 02	0.4045098E 02	0.7142735E 02	0.7142730E 02

Fig. 7.25

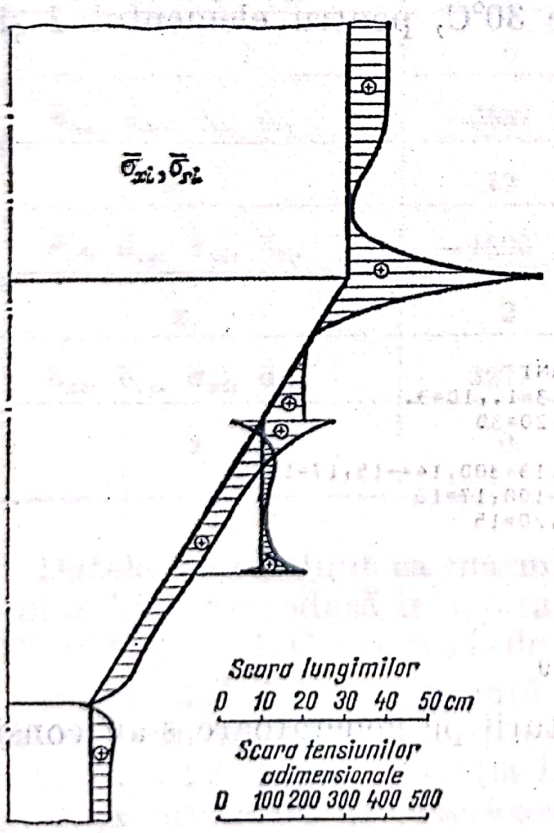


Fig. 7.26

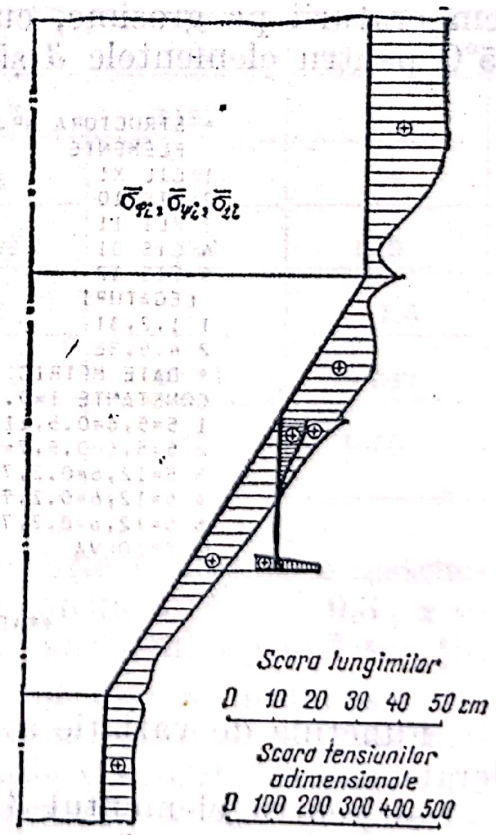


Fig. 7.27

Scanned with OKEN Scanner

Deoarece o încălzire uniformă a întregii structuri nu duce la apariţia unei stări de tensiune, nu s-a considerat această situaţie, ci numai cîmpuri staţionare de temperatură, care variază pe grosimea elementelor sau pe generatoare.

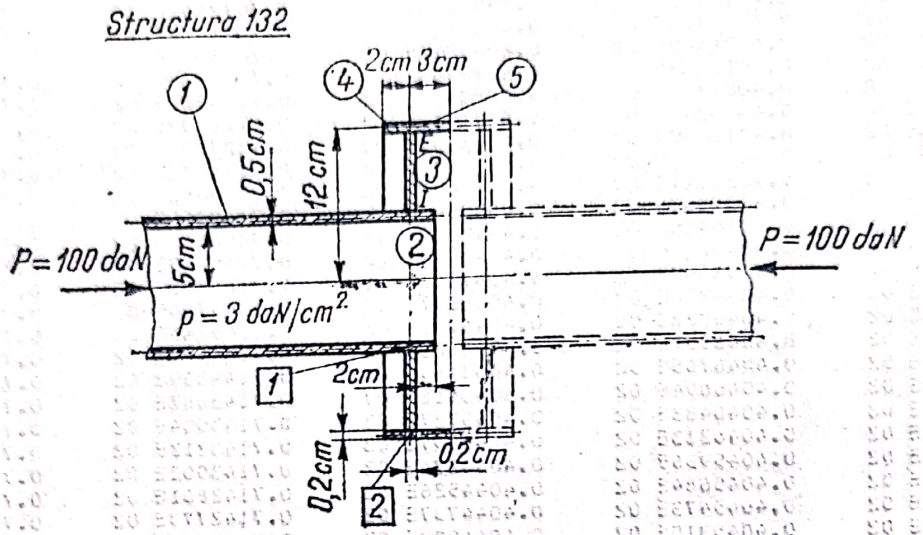


Fig. 7.28

Pentru elementele *1*, *3* şi *5* s-a considerat o variaţie liniară a temperaturii pe grosime, cu valorile 30°C, pentru elementul *1* şi 15°C pentru elementele *3* şi *5*.

```
* STRUCTURA NR. 132
  ELEMENTE
1 CIL X1
2 CIS 10
3 PLI 11
4 CIS 01
5 CIS 12
  LEGATURI
1 1,2,3I
2 4,5,3E
* DATE METRIC    (CM SI DAN)
CONSTANTE 1=0.3,2=12.E-6,3=1.,10=3.
1 5=5,6=0.5,11=-100,13=1,20=30
2 5=5,6=0.5,7=2,10=0
3 5=12,6=0.2,7=5,11=-100,13=300,14=-15,17=15
4 5=12,6=0.2,7=2,10=0,16=100,17=10
5 5=12,6=0.2,7=3,11=-100,20=15
* REZOLVA

**ATOI= 3
```

Fig. 7.29

Funcţiile de variaţie a temperaturii pe generatoare s-au considerat :

— pentru elementul *3*

$T(\rho) = 300 - 15\rho$;

—pentru elementul 4

$$T(x) = 100 + 10x$$

în care ρ și x sînt abscisele metrice ale elementelor respective.

De asemenea s-a considerat că structura este solicitată la compresiune de o forță axială $P = 100$ daN și de către o presiune interioară $p = 3$ daN/cm².

Tabelul 7.1

Valorile tensiunilor adimensionale maxime pentru compensatorul din figura 7.28

Elementul nr.	Notații	Tensiunile adimensionale maxime și abscisele corespunzătoare (în cm)			
		Direcția longitudinală (radială)		Direcția circumferențială	
		Interior	Exterior	Interior	Exterior
1	$\bar{\sigma}_{xi}$, $\bar{\sigma}_{xe}$, $\bar{\sigma}_{\varphi i}$, $\bar{\sigma}_{\varphi e}$	−207	224	55	98
	x	0	0	1,5	0,5
2	$\bar{\sigma}_{xi}$, $\bar{\sigma}_{xe}$, $\bar{\sigma}_{\varphi i}$, $\bar{\sigma}_{\varphi e}$	173	−173	73	−49
	x	0	0	0	0,7
3	$\bar{\sigma}_{\rho i}$, $\bar{\sigma}_{\rho e}$, $\bar{\sigma}_{ti}$, $\bar{\sigma}_{te}$	−3987	4017	1197	−1157
	ρ	12	12	7	7
4	$\bar{\sigma}_{xi}$, $\bar{\sigma}_{xe}$, $\bar{\sigma}_{\varphi i}$, $\bar{\sigma}_{\varphi e}$	−1808	1808	−529	619
	x	2	2	2	1,6
5	$\bar{\sigma}_{xi}$, $\bar{\sigma}_{xe}$, $\bar{\sigma}_{\varphi i}$, $\bar{\sigma}_{\varphi e}$	2277	−2110	696	−642
	x	0	0	0	0,15

Datele s-au definit ca mărimi metrice, lista completă a instrucțiunilor fiind reprodusă în figura 7.29. Se constată că $\mu = 0{,}3$; $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ și $E = 1$. Constantele de integrare s-au calculat prin 3 iterații.

În tabelul 7.1 se prezintă valorile tensiunilor adimensionale maxime — în valoare absolută — pentru fiecare element al structurii din figura 7.28, pentru direcția longitudinală și circumferențială, pe suprafața interioară și exterioară. De asemenea se dau și valorile absciselor corespunzătoare.

Scanned with OKEN Scanner

ELEMENTUL NR. 3 DE TIP PLJ

ITA	SRI	SRIMIN
		-0.398E 04
0.500E 01	0.243E 04	
0.520E 01	0.245E 04	
0.540E 01	0.246E 04	
0.560E 01	0.245E 04	
0.580E 01	0.242E 04	
0.600E 01	0.238E 04	
0.619E 01	0.233E 04	
0.639E 01	0.227E 04	
0.659E 01	0.219E 04	
0.679E 01	0.210E 04	
0.699E 01	0.199E 04	
0.719E 01	0.188E 04	
0.739E 01	0.175E 04	
0.759E 01	0.161E 04	
0.779E 01	0.147E 04	
0.799E 01	0.131E 04	
0.819E 01	0.113E 04	
0.839E 01	0.958E 03	
0.859E 01	0.766E 03	
0.879E 01	0.564E 03	
0.899E 01	0.351E 03	
0.919E 01	0.129E 03	
0.939E 01	-0.102E 03	
0.959E 01	-0.345E 03	
0.979E 01	-0.597E 03	
0.999E 01	-0.858E 03	
0.101E 02	-0.112E 04	
0.103E 02	-0.141E 04	
0.105E 02	-0.170E 04	
0.107E 02	-0.199E 04	
0.109E 02	-0.230E 04	
0.111E 02	-0.262E 04	
0.113E 02	-0.295E 04	
0.115E 02	-0.328E 04	
0.117E 02	-0.363E 04	
0.119E 02	-0.398E 04	

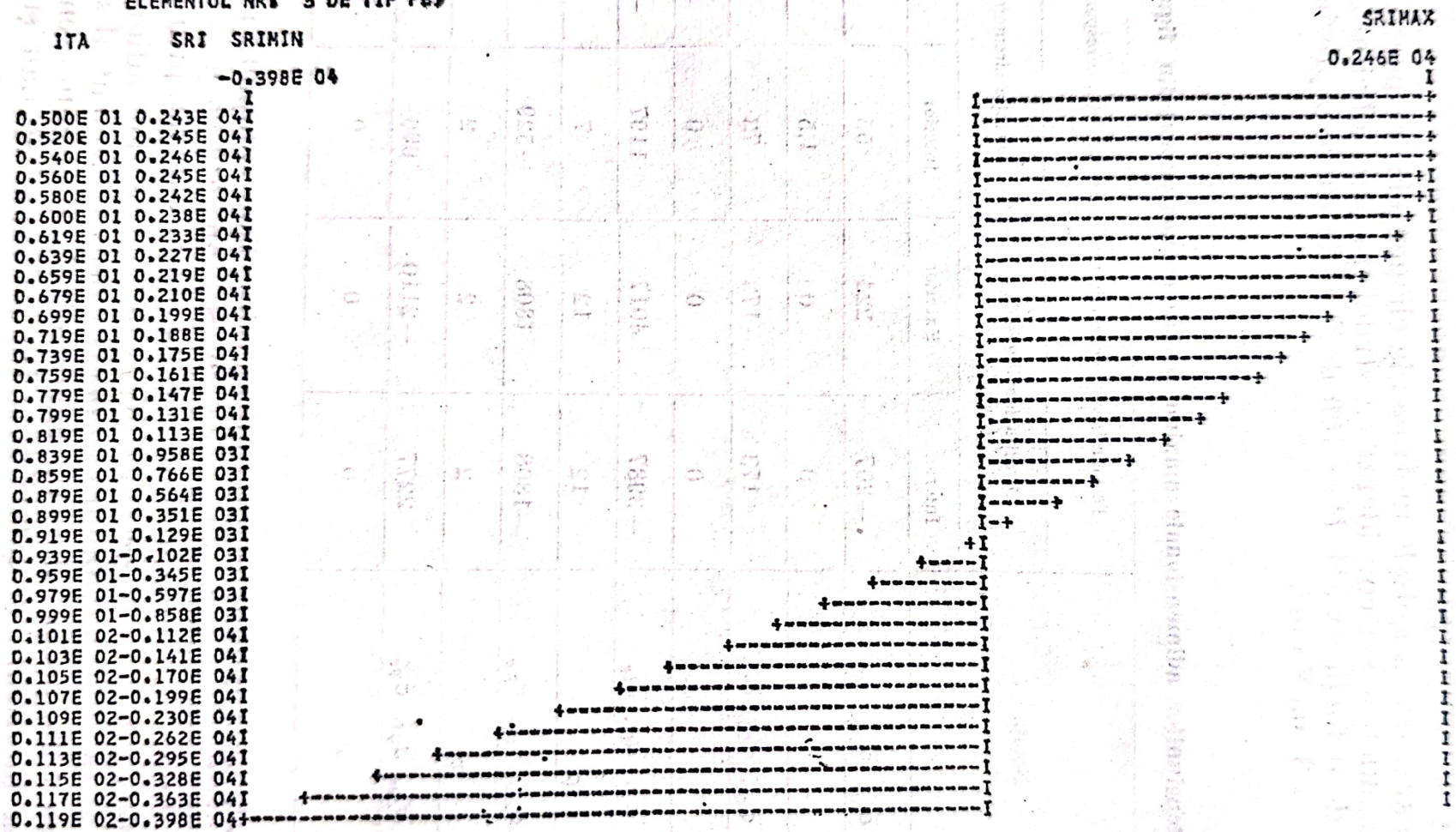


Fig. 7.30

Scanned with OKEN Scanner

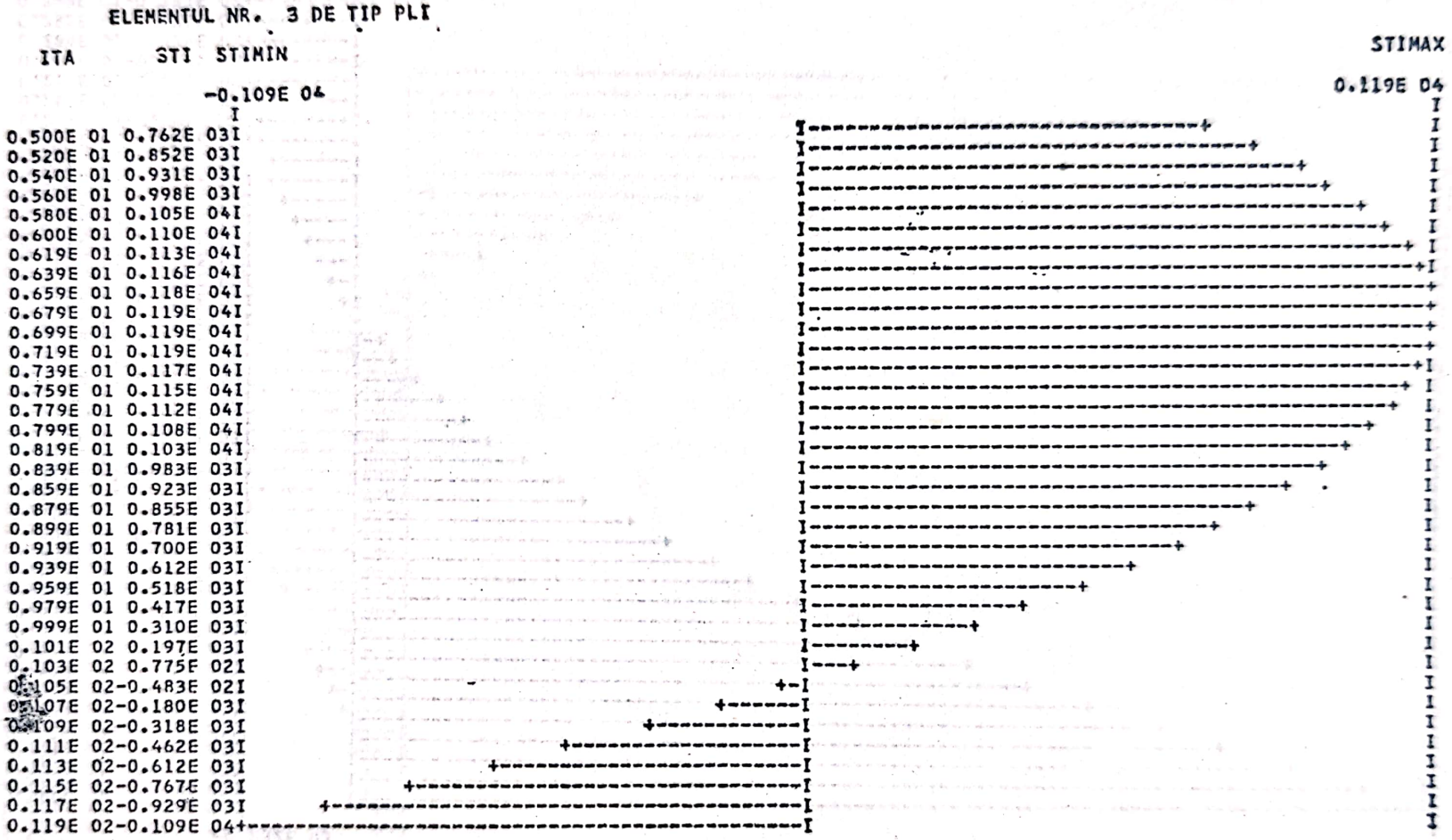

ELEMENTUL NR. 3 DE TIP PLI
ITA STI STIMIN
-0.109E 04
STIMAX
0.119E 04
0.500E 01 0.762E 03
0.520E 01 0.852E 03
0.540E 01 0.931E 03
0.560E 01 0.998E 03
0.580E 01 0.105E 04
0.600E 01 0.110E 04
0.619E 01 0.113E 04
0.639E 01 0.116E 04
0.659E 01 0.118E 04
0.679E 01 0.119E 04
0.699E 01 0.119E 04
0.719E 01 0.119E 04
0.739E 01 0.117E 04
0.759E 01 0.115E 04
0.779E 01 0.112E 04
0.799E 01 0.108E 04
0.819E 01 0.103E 04
0.839E 01 0.983E 03
0.859E 01 0.923E 03
0.879E 01 0.855E 03
0.899E 01 0.781E 03
0.919E 01 0.700E 03
0.939E 01 0.612E 03
0.959E 01 0.518E 03
0.979E 01 0.417E 03
0.999E 01 0.310E 03
0.101E 02 0.197E 03
0.103E 02 0.775E 02
0.105E 02-0.483E 02
0.107E 02-0.180E 03
0.109E 02-0.318E 03
0.111E 02-0.462E 03
0.113E 02-0.612E 03
0.115E 02-0.767E 03
0.117E 02-0.929E 03
0.119E 02-0.109E 04

Fig. 7.31

ELEMENTUL NR. 5 DE TIP CIS

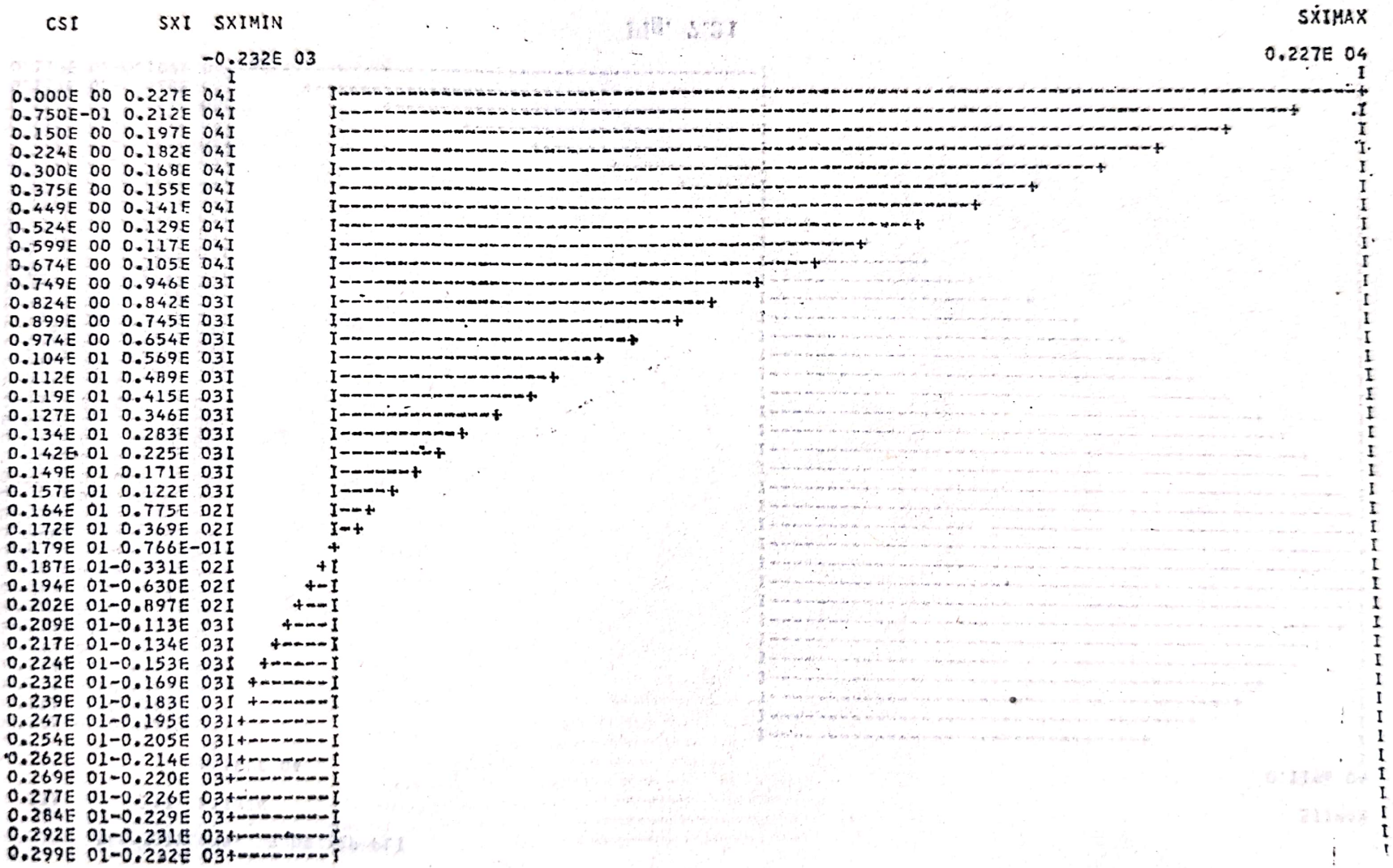


Fig. 7.32

ELEMENTUL NR. 5 DE TIP CIS

CSI	SFI	SFIMIN	SFIMAX
		-0.117E 03	0.696E 03
0.000E 00	0.696E 03		
0.750E-01	0.590E 03		
0.150E 00	0.493E 03		
0.224E 00	0.405E 03		
0.300E 00	0.327E 03		
0.375E 00	0.256E 03		
0.449E 00	0.193E 03		
0.524E 00	0.138E 03		
0.599E 00	0.900E 02		
0.674E 00	0.478E 02		
0.749E 00	0.116E 02		
0.824E 00	-0.190E 02		
0.899E 00	-0.447E 02		
0.974E 00	-0.658E 02		
0.104E 01	-0.827E 02		
0.112E 01	-0.958E 02		
0.119E 01	-0.105E 03		
0.127E 01	-0.112E 03		
0.134E 01	-0.116E 03		
0.142E 01	-0.117E 03		
0.149E 01	-0.117E 03		
0.157E 01	-0.115E 03		
0.164E 01	-0.111E 03		
0.172E 01	-0.106E 03		
0.179E 01	-0.100E 03		
0.187E 01	-0.941E 02		
0.194E 01	-0.870E 02		
0.202E 01	-0.797E 02		
0.209E 01	-0.722E 02		
0.217E 01	-0.647E 02		
0.224E 01	-0.574E 02		
0.232E 01	-0.504E 02		
0.239E 01	-0.438E 02		
0.247E 01	-0.377E 02		
0.254E 01	-0.323E 02		
0.262E 01	-0.276E 02		
0.269E 01	-0.236E 02		
0.277E 01	-0.205E 02		
0.284E 01	-0.182E 02		
0.292E 01	-0.169E 02		
0.299E 01	-0.164E 02		

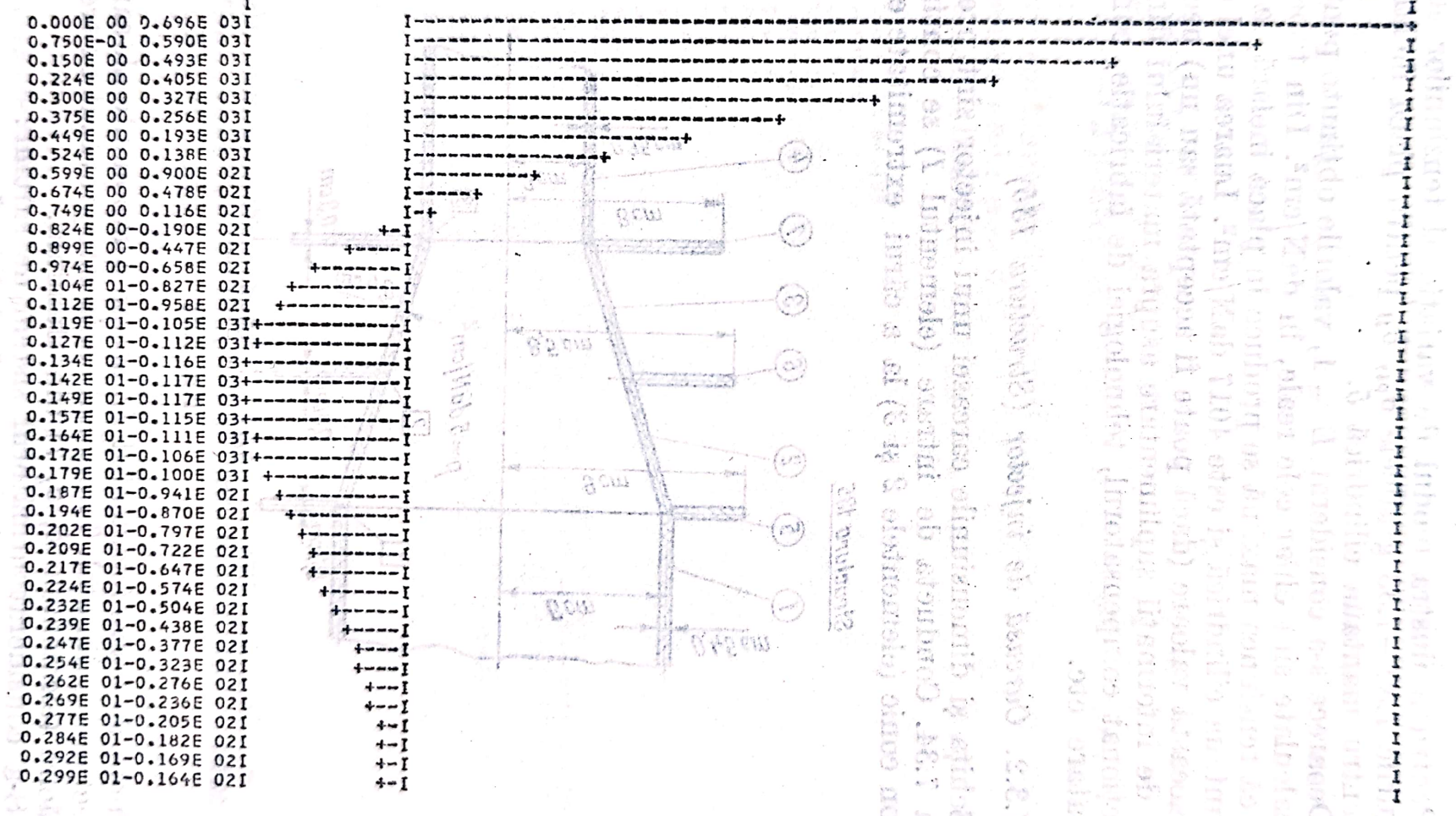


Fig. 7.33

Pentru a ilustra modul de variaţie al tensiunilor se reproduc în figurile 7.30—7.33 graficele $\overline{\sigma}_{\rho i}$, $\overline{\sigma}_{ti}$ pentru placa inelară *3* şi $\overline{\sigma}_{xi}$, $\overline{\sigma}_{\varphi i}$ pentru mantaua cilindrică *5*.

Deoarece s-a considerat $E = 1$, valorile obţinute pentru tensiunile calculate sînt chiar cele reale, în daN/cm². Din tabelul 7.1 rezultă că tensiunea maximă se produce în placa inelară, la îmbinarea cu mantaua cilindrică şi este 4017 daN/cm². Luarea unei decizii privind această valoare (dacă poate fi acceptată sau nu) necesită obţinerea de informaţii suplimentare asupra materialului din care este confecţionat compensatorul, tehnologiei de fabricaţie, condiţiilor de exploatare etc.

7.3.2. *Carcasă de injector (Structura 135)*

Schiţa şi dimensiunile carcasei unui injector sînt prezentate în figura 7.34. Conducta de intrare (elementul *1*) se continuă cu un tronson conic (elementele *2* şi *3*) la a cărui extremitate este sudată

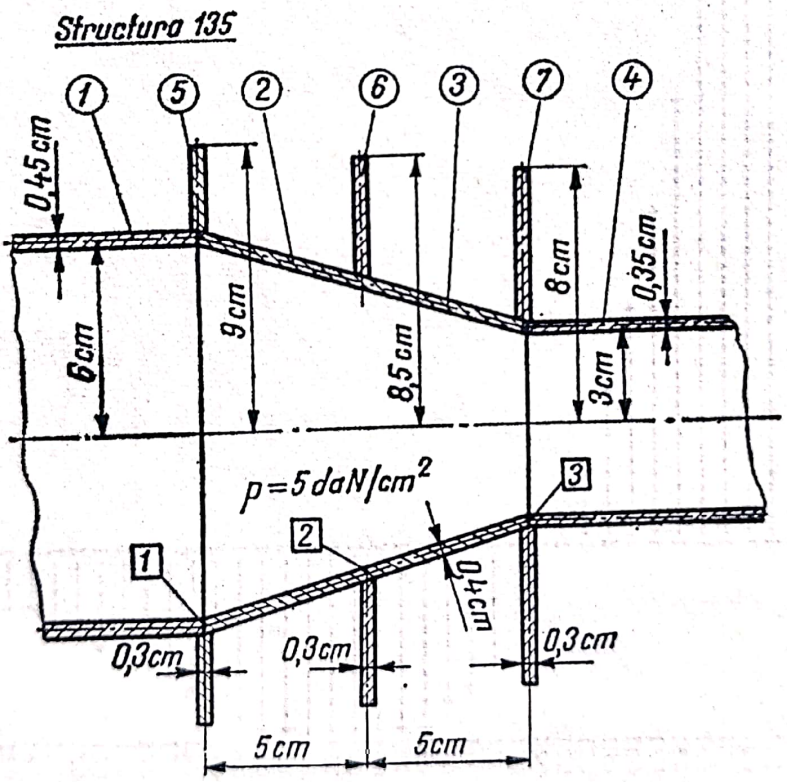


Fig. 7.34

conducta de ieşire (elementul *4*), aceste componente ale carcasei fiind confecţionate din oţel. Tronsonul conic este prevăzut cu trei aripioare de răcire (elementele *5*, *6*, *7*) din aluminiu.

S-a considerat următorul sistem de sarcini:

— presiune interioară $p = 5$ daN/cm²;

Scanned with OKEN Scanner

— variație a temperaturii pe grosime, pentru elementele *1*, *2*, *3*, *4* cu $\Delta T = 30°C$;
— încălzire a elementelor *1*, *2*, *3*, *4* la temperatura 220°C;
— variație radială a temperaturii după o lege de forma

$$T(\rho) = a_0 + a_2\rho^2$$

pentru aripioarele de răcire, în care ρ este abscisa metrică. Valorile coeficienților a_0 și a_2 sînt: $a_0 = 256$, $a_2 = -1$ pentru elementul *5*; $a_0 = 260{,}5$; $a_2 = -2$ pentru elementul *6* și $a_0 = 247$, $a_2 = -3$ pentru elementul *7*.

Pentru constantele de material s-au considerat valorile:
— pentru oțel: $\mu = 0{,}3$, $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$, $E = 2{,}1$;
— pentru aluminiu: $\mu = 0{,}35$, $\alpha = 24 \cdot 10^{-6}$, $E = 0{,}7$.

```
  STRUCTURA NR.135
  ELEMENTE
1 CIL X1
2 CON X11
3 CON X11
4 CIL 1X
5 PLI 10
6 PLI 10
7 PLI 10
  LEGATURI
1 1,2E,5
2 6,2I,3E
3 4,3I,7
* DATE METRIC  (CM SI DAN)
1 1=0.3,2=12.E-6,3=2.1,5=6,6=0.45,10=5,16=220,20=30
2 1=0.3,2=12.E-6,3=2.1,5=6,6=0.4,7=4.5,8=1.27934,10=5,13=220,16=30
3 1=0.3,2=12.E-6,3=2.1,5=4.5,6=0.4,7=3,8=1.27934,10=5,13=220,16=30
4 1=0.3,2=12.E-6,3=2.1,5=3,6=0.35,10=5,16=220,20=30
5 1=0.35,2=24.E-6,3=0.7,5=9,6=0.3,7=6,13=256,15=-1
6 1=0.35,2=24.E-6,3=0.7,5=8.5,6=0.3,7=4.5,13=260.5,15=-2
7 1=0.35,2=24.E-6,3=0.7,5=8,6=0.3,7=3,13=247,15=-3
* REZOLVA

          **ATOL= 2
```

Fig. 7.35

Datele s-au definit ca mărimi metrice, lista completă a instrucțiunilor fiind reprodusă în figura 7.35. Constantele de integrare s-au calculat prin 2 iterații.

Pentru a oferi o imagine asupra stării de tensiune din carcasa injectorului, prezentată mai sus, se reproduc în figurile 7.36—7.43 graficele tensiunilor adimensionale din cele două elemente în care s-a descompus tronsonul conic al carcasei. În figurile 7.44 și 7.45 se reproduc graficele tensiunilor adimensionale $\bar{\sigma}_{\rho i}$ și $\bar{\sigma}_{ti}$ din aripioara de răcire din mijloc (elementul *6*).

Scanned with OKEN Scanner

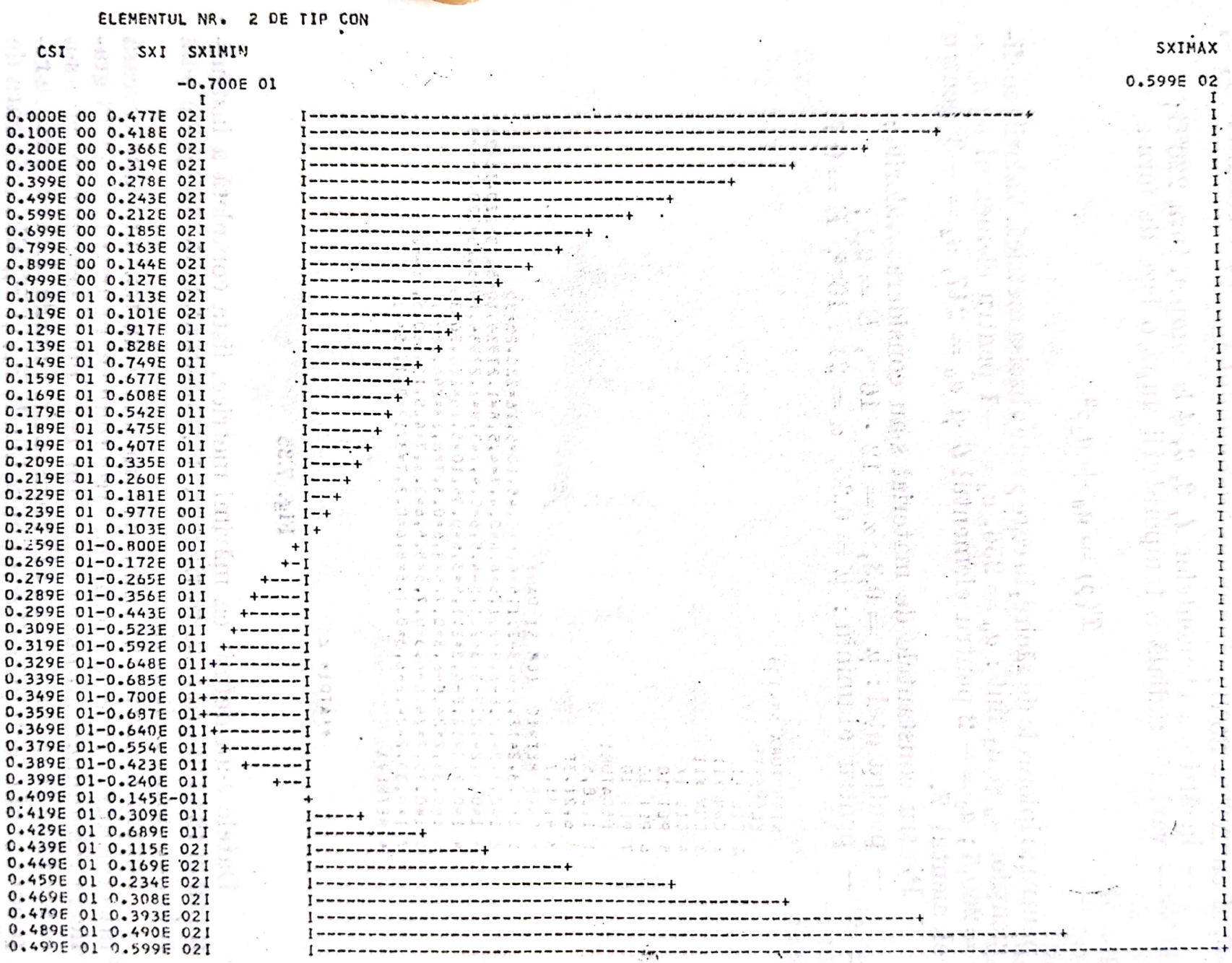

ELEMENTUL NR. 2 DE TIP CON
CSI
SXI
SXIMIN
-0.700E 01
SXIMAX
0.599E 02
0.000E 00 0.477E 02
0.100E 00 0.418E 02
0.200E 00 0.366E 02
0.300E 00 0.319E 02
0.399E 00 0.278E 02
0.499E 00 0.243E 02
0.599E 00 0.212E 02
0.699E 00 0.185E 02
0.799E 00 0.163E 02
0.899E 00 0.144E 02
0.999E 00 0.127E 02
0.109E 01 0.113E 02
0.119E 01 0.101E 02
0.129E 01 0.917E 01
0.139E 01 0.828E 01
0.149E 01 0.749E 01
0.159E 01 0.677E 01
0.169E 01 0.608E 01
0.179E 01 0.542E 01
0.189E 01 0.475E 01
0.199E 01 0.407E 01
0.209E 01 0.335E 01
0.219E 01 0.260E 01
0.229E 01 0.181E 01
0.239E 01 0.977E 00
0.249E 01 0.103E 00
0.259E 01-0.800E 00
0.269E 01-0.172E 01
0.279E 01-0.265E 01
0.289E 01-0.356E 01
0.299E 01-0.443E 01
0.309E 01-0.523E 01
0.319E 01-0.592E 01
0.329E 01-0.648E 01
0.339E 01-0.685E 01
0.349E 01-0.700E 01
0.359E 01-0.697E 01
0.369E 01-0.640E 01
0.379E 01-0.554E 01
0.389E 01-0.423E 01
0.399E 01-0.240E 01
0.409E 01 0.145E-01
0.419E 01 0.309E 01
0.429E 01 0.689E 01
0.439E 01 0.115E 02
0.449E 01 0.169E 02
0.459E 01 0.234E 02
0.469E 01 0.308E 02
0.479E 01 0.393E 02
0.489E 01 0.490E 02
0.499E 01 0.599E 02

Fig. 7.36

ELEMENTUL NR. 2 DE TIP CON

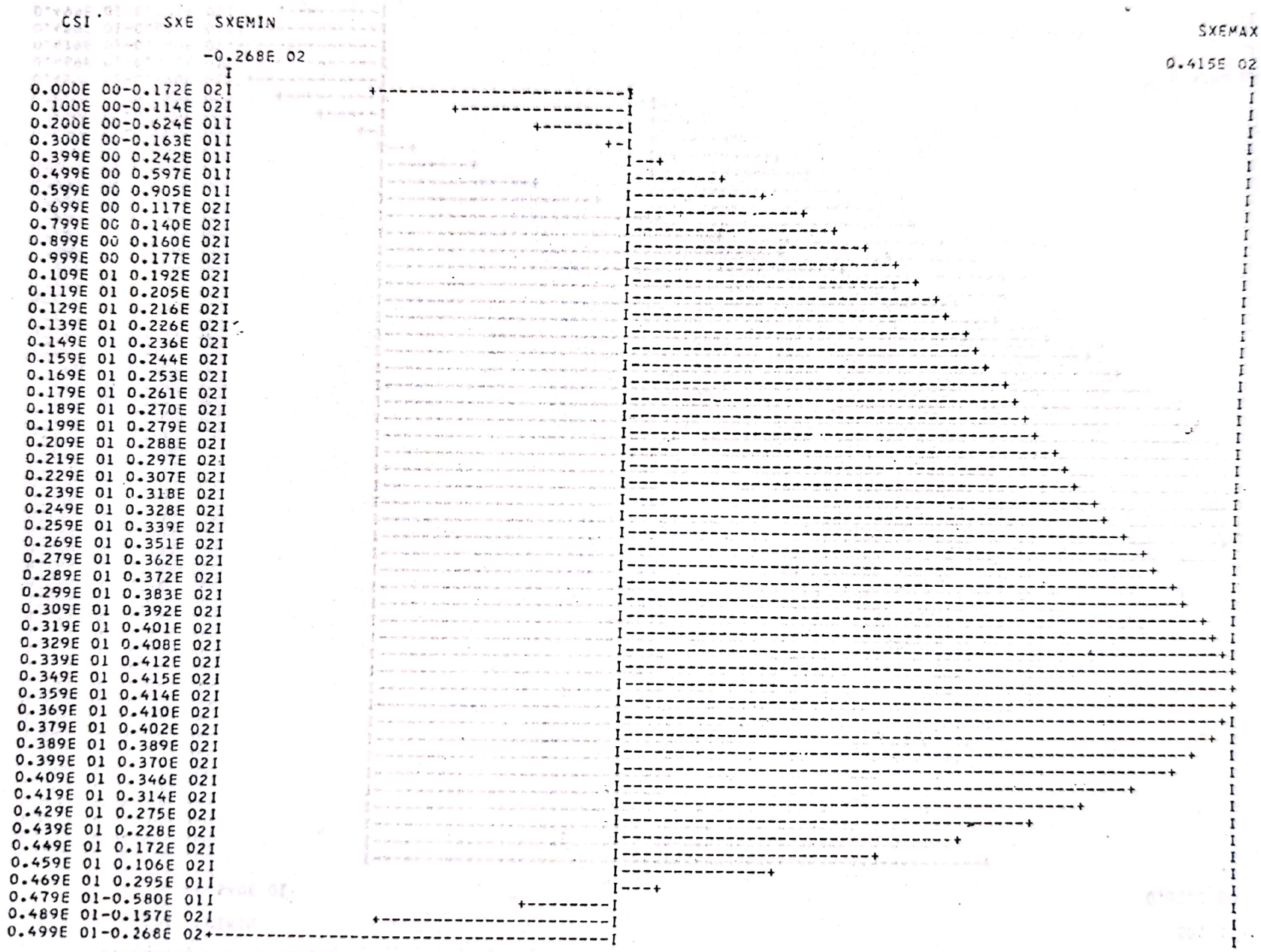


Fig. 7.37

ELEMENTUL NR. 2 DE TIP Cau

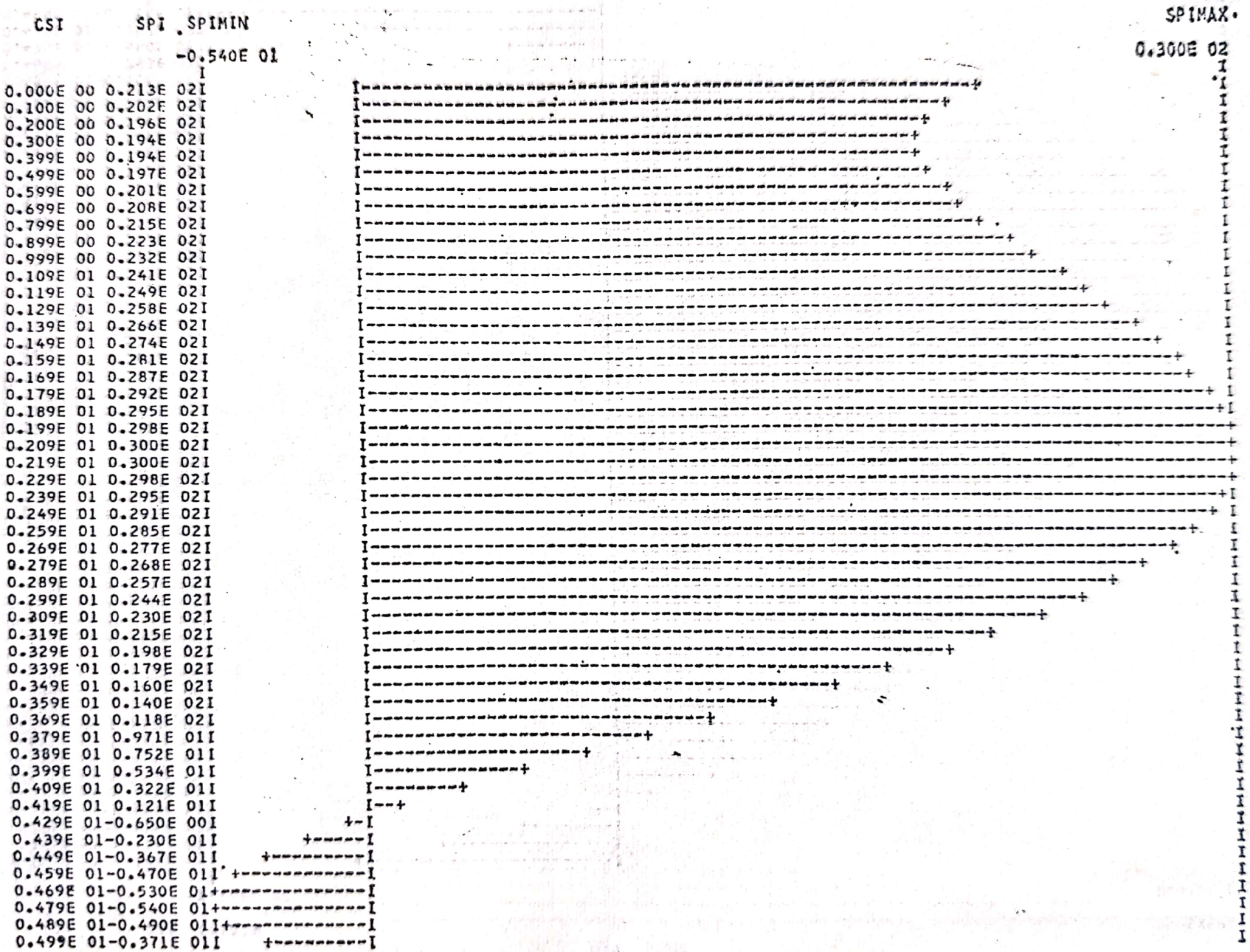


Fig. 7.38

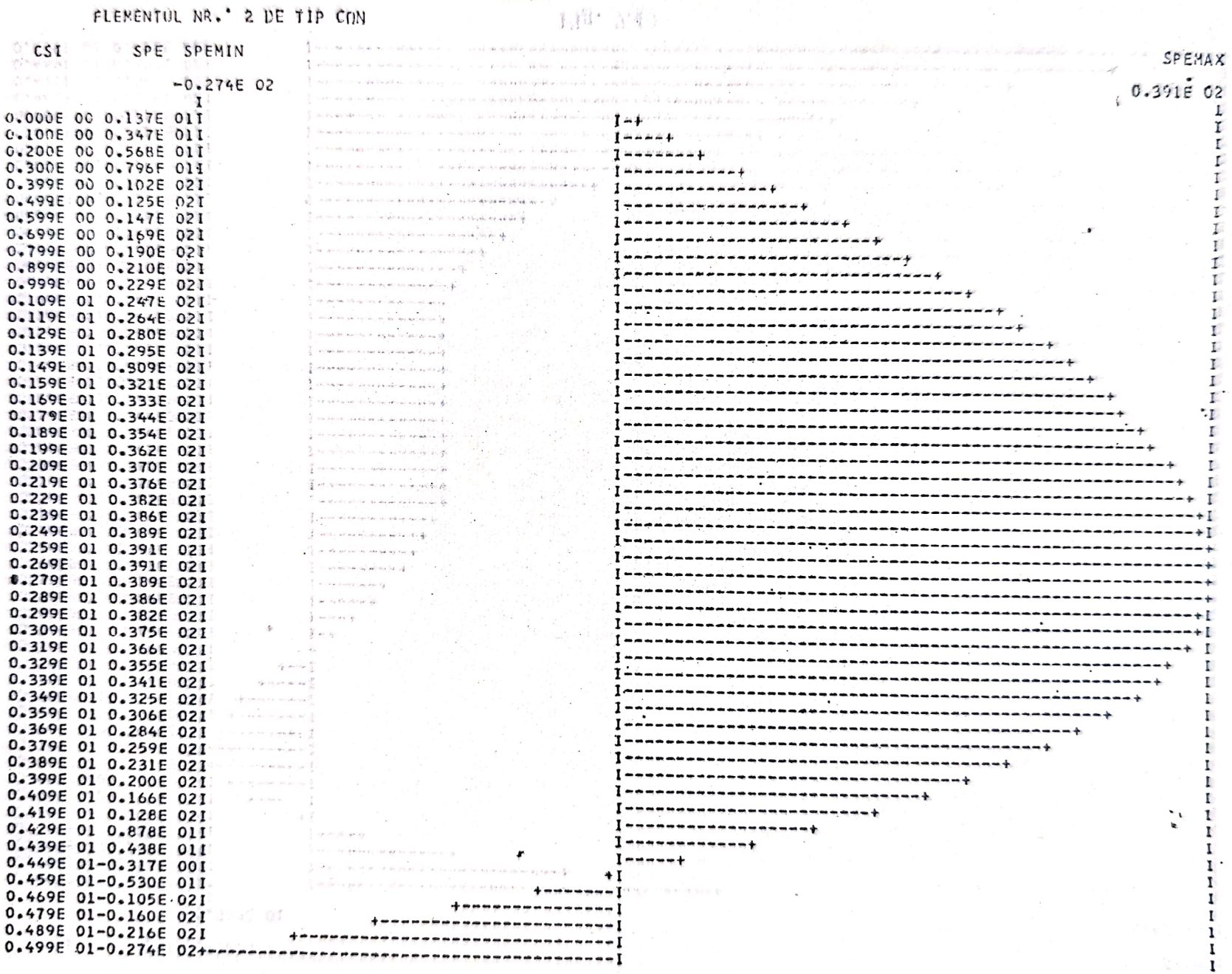

ELEMENTUL NR.* 2 DE TIP CON
CSI
SPE
SPEMIN
-0.274E 02
SPEMAX
0.391E 02
0.000E 00 0.137E 01
0.100E 00 0.347E 01
0.200E 00 0.568E 01
0.300E 00 0.796E 01
0.399E 00 0.102E 02
0.499E 00 0.125E 02
0.599E 00 0.147E 02
0.699E 00 0.169E 02
0.799E 00 0.190E 02
0.899E 00 0.210E 02
0.999E 00 0.229E 02
0.109E 01 0.247E 02
0.119E 01 0.264E 02
0.129E 01 0.280E 02
0.139E 01 0.295E 02
0.149E 01 0.309E 02
0.159E 01 0.321E 02
0.169E 01 0.333E 02
0.179E 01 0.344E 02
0.189E 01 0.354E 02
0.199E 01 0.362E 02
0.209E 01 0.370E 02
0.219E 01 0.376E 02
0.229E 01 0.382E 02
0.239E 01 0.386E 02
0.249E 01 0.389E 02
0.259E 01 0.391E 02
0.269E 01 0.391E 02
0.279E 01 0.389E 02
0.289E 01 0.386E 02
0.299E 01 0.382E 02
0.309E 01 0.375E 02
0.319E 01 0.366E 02
0.329E 01 0.355E 02
0.339E 01 0.341E 02
0.349E 01 0.325E 02
0.359E 01 0.306E 02
0.369E 01 0.284E 02
0.379E 01 0.259E 02
0.389E 01 0.231E 02
0.399E 01 0.200E 02
0.409E 01 0.166E 02
0.419E 01 0.128E 02
0.429E 01 0.878E 01
0.439E 01 0.438E 01
0.449E 01-0.317E 00
0.459E 01-0.530E 01
0.469E 01-0.105E 02
0.479E 01-0.160E 02
0.489E 01-0.216E 02
0.499E 01-0.274E 02

Fig. 7.39

ELEMENTUL NR. 3 DE TIP CON

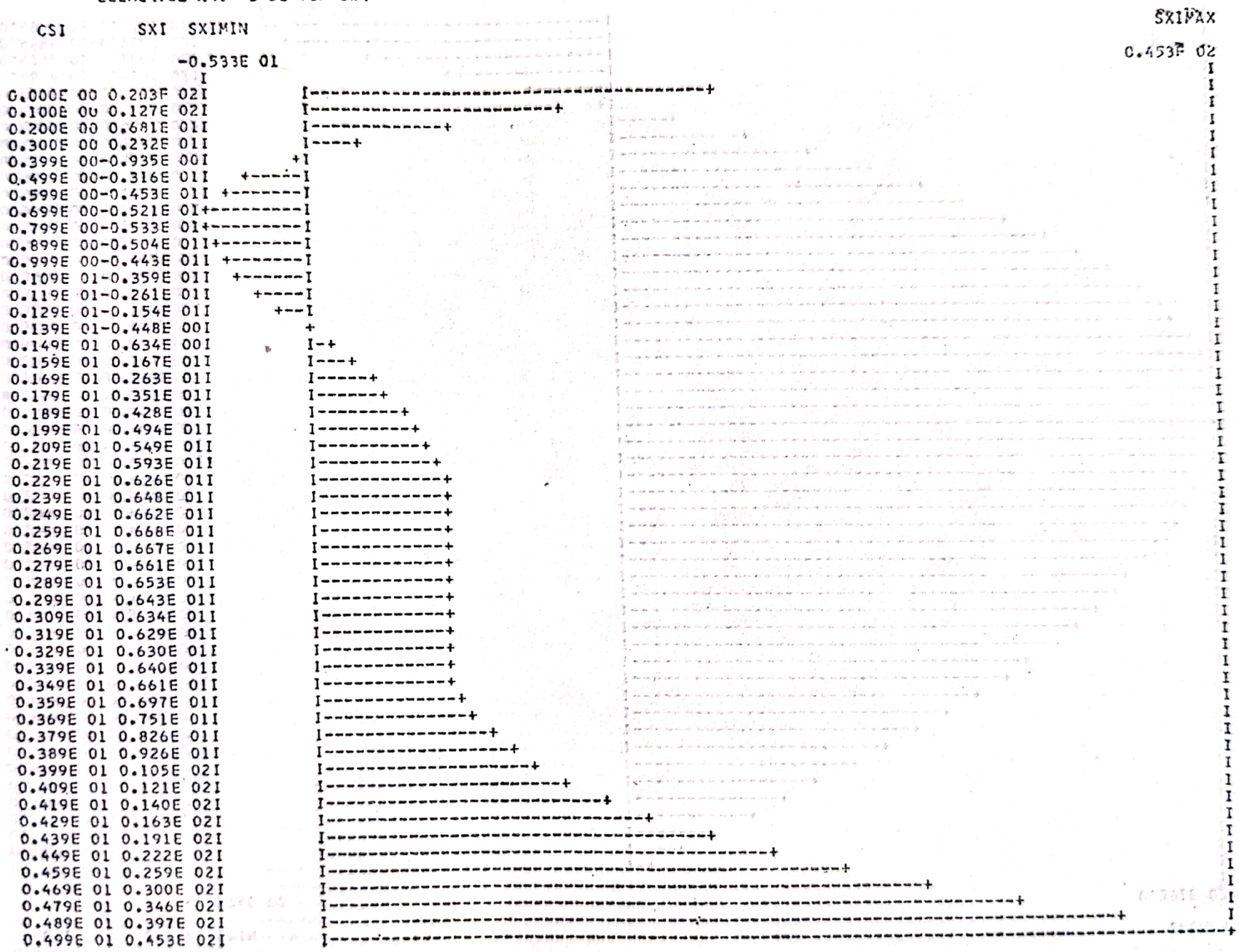


Fig. 7.40

Scanned with OKEN Scanner

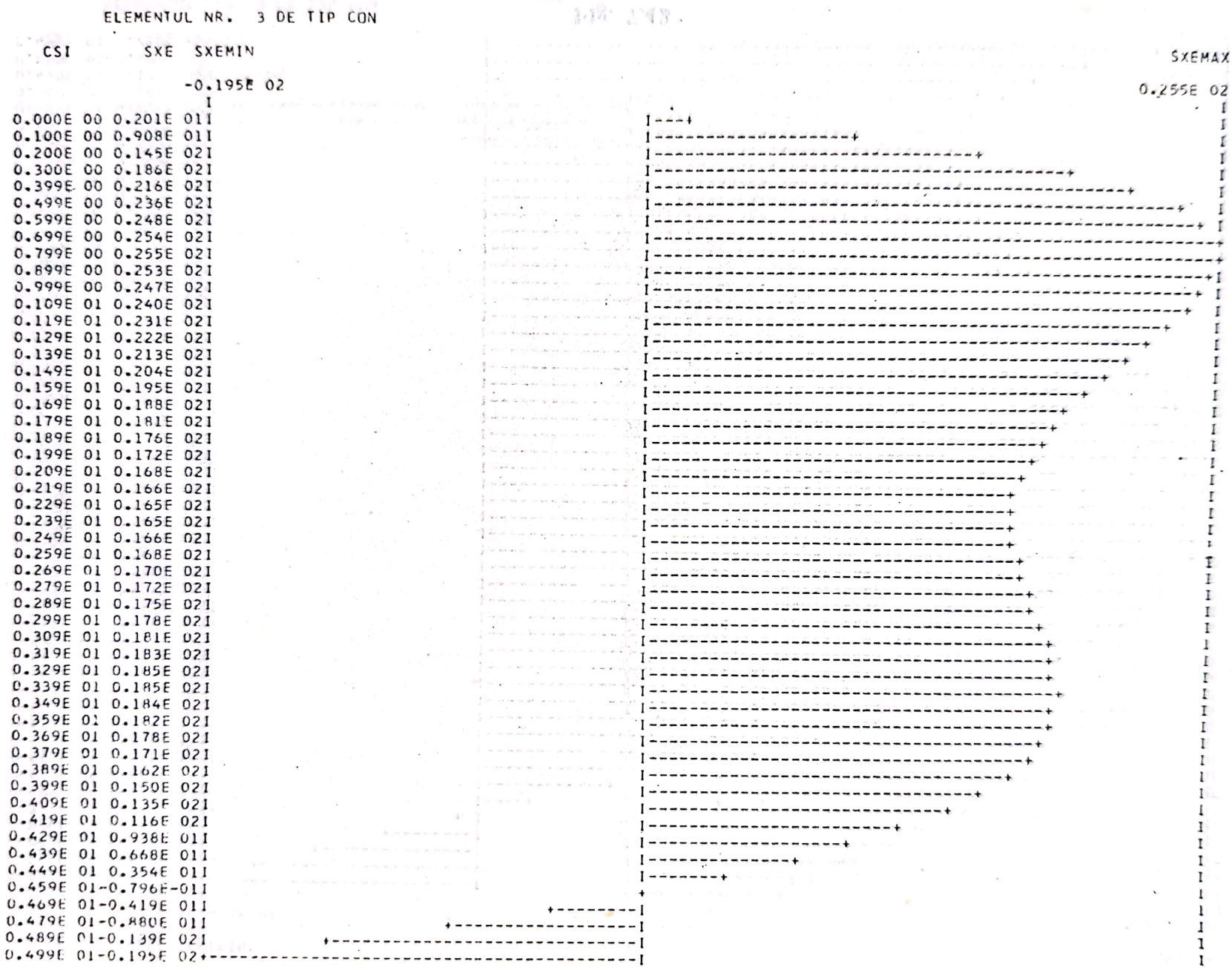

ELEMENTUL NR. 3 DE TIP CON
CSI
SXE
SXEMIN
-0.195E 02
SXEMAX
0.255E 02
0.000E 00 0.201E 01
0.100E 00 0.908E 01
0.200E 00 0.145E 02
0.300E 00 0.186E 02
0.399E 00 0.216E 02
0.499E 00 0.236E 02
0.599E 00 0.248E 02
0.699E 00 0.254E 02
0.799E 00 0.255E 02
0.899E 00 0.253E 02
0.999E 00 0.247E 02
0.109E 01 0.240E 02
0.119E 01 0.231E 02
0.129E 01 0.222E 02
0.139E 01 0.213E 02
0.149E 01 0.204E 02
0.159E 01 0.195E 02
0.169E 01 0.188E 02
0.179E 01 0.181E 02
0.189E 01 0.176E 02
0.199E 01 0.172E 02
0.209E 01 0.168E 02
0.219E 01 0.166E 02
0.229E 01 0.165E 02
0.239E 01 0.165E 02
0.249E 01 0.166E 02
0.259E 01 0.168E 02
0.269E 01 0.170E 02
0.279E 01 0.172E 02
0.289E 01 0.175E 02
0.299E 01 0.178E 02
0.309E 01 0.181E 02
0.319E 01 0.183E 02
0.329E 01 0.185E 02
0.339E 01 0.185E 02
0.349E 01 0.184E 02
0.359E 01 0.182E 02
0.369E 01 0.178E 02
0.379E 01 0.171E 02
0.389E 01 0.162E 02
0.399E 01 0.150E 02
0.409E 01 0.135E 02
0.419E 01 0.116E 02
0.429E 01 0.938E 01
0.439E 01 0.668E 01
0.449E 01 0.354E 01
0.459E 01-0.796E-01
0.469E 01-0.419E 01
0.479E 01-0.880E 01
0.489E 01-0.139E 02
0.499E 01-0.195E 02

Fig. 7.41

ELEMENTUL NR. 3 DE TIP CON

CSI	SPI	SPIMIN	SPIMAX
		-0.903E 01	0.237E 02
0.000E 00	-0.903E 01		
0.100E 00	-0.739E 01		
0.200E 00	-0.538E 01		
0.300E 00	-0.312E 01		
0.399E 00	-0.725E 00		
0.499E 00	0.171E 01		
0.599E 00	0.413E 01		
0.699E 00	0.648E 01		
0.799E 00	0.871E 01		
0.899E 00	0.108E 02		
0.999E 00	0.127E 02		
0.109E 01	0.145E 02		
0.119E 01	0.161E 02		
0.129E 01	0.175E 02		
0.139E 01	0.187E 02		
0.149E 01	0.198E 02		
0.159E 01	0.208E 02		
0.169E 01	0.216E 02		
0.179E 01	0.222E 02		
0.189E 01	0.227E 02		
0.199E 01	0.232E 02		
0.209E 01	0.235E 02		
0.219E 01	0.236E 02		
0.229E 01	0.237E 02		
0.239E 01	0.237E 02		
0.249E 01	0.236E 02		
0.259E 01	0.235E 02		
0.269E 01	0.232E 02		
0.279E 01	0.229E 02		
0.289E 01	0.225E 02		
0.299E 01	0.220E 02		
0.309E 01	0.215E 02		
0.319E 01	0.209E 02		
0.329E 01	0.203E 02		
0.339E 01	0.196E 02		
0.349E 01	0.190E 02		
0.359E 01	0.183E 02		
0.369E 01	0.176E 02		
0.379E 01	0.169E 02		
0.389E 01	0.163E 02		
0.399E 01	0.158E 02		
0.409E 01	0.153E 02		
0.419E 01	0.150E 02		
0.429E 01	0.148E 02		
0.439E 01	0.148E 02		
0.449E 01	0.150E 02		
0.459E 01	0.156E 02		
0.469E 01	0.164E 02		
0.479E 01	0.176E 02		
0.489E 01	0.192E 02		
0.499E 01	0.213E 02		

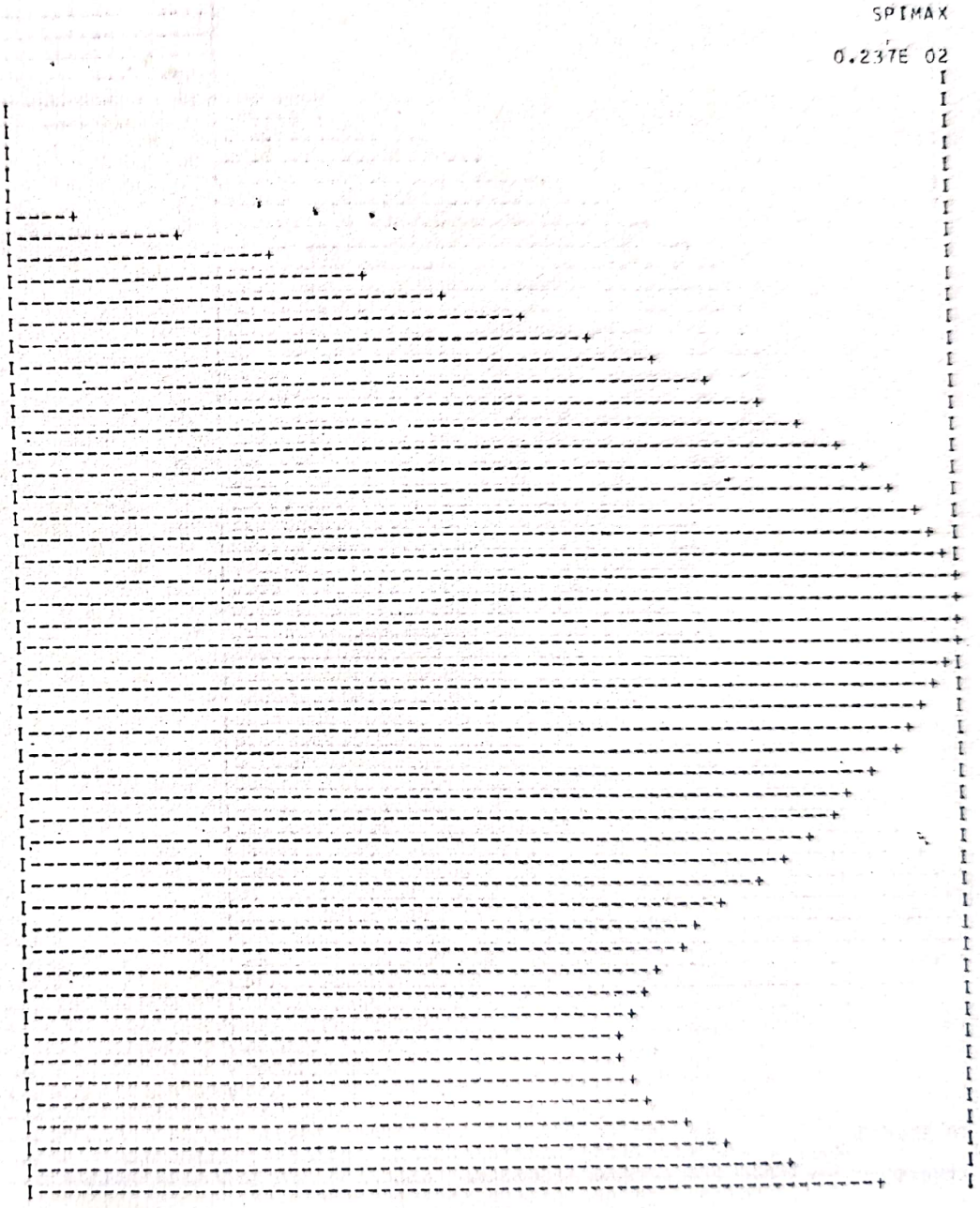


Fig. 7.42

Scanned with OKEN Scanner

ELEMENTUL NR. 3 DE TIP CON

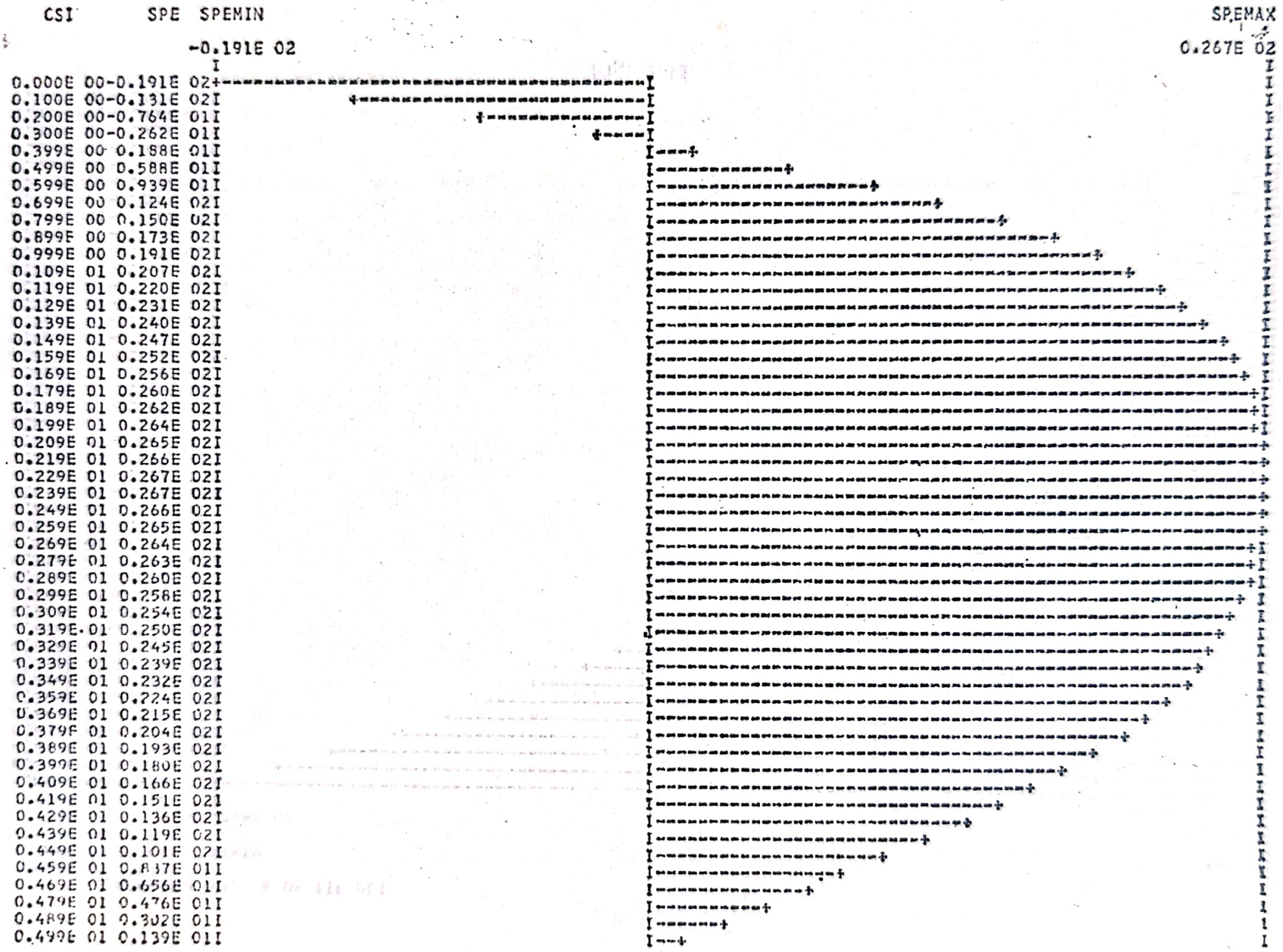


Fig .7.43

Scanned with OKEN Scanner

ELEMENTUL NR. 6 DE TIP PLI

ITA	SRI	SRIMIN	SRIMAX
		-0.326E 02	-0.787E-04
0.450E 01	-0.326E 02		
0.459E 01	-0.307E 02		
0.469E 01	-0.288E 02		
0.479E 01	-0.271E 02		
0.489E 01	-0.255E 02		
0.499E 01	-0.240E 02		
0.509E 01	-0.226E 02		
0.519E 01	-0.212E 02		
0.529E 01	-0.199E 02		
0.539E 01	-0.187E 02		
0.549E 01	-0.176E 02		
0.559E 01	-0.165E 02		
0.569E 01	-0.155E 02		
0.579E 01	-0.145E 02		
0.589E 01	-0.136E 02		
0.599E 01	-0.128E 02		
0.609E 01	-0.119E 02		
0.619E 01	-0.111E 02		
0.629E 01	-0.104E 02		
0.639E 01	-0.971E 01		
0.649E 01	-0.903E 01		
0.659E 01	-0.837E 01		
0.669E 01	-0.775E 01		
0.679E 01	-0.715E 01		
0.689E 01	-0.658E 01		
0.699E 01	-0.603E 01		
0.709E 01	-0.551E 01		
0.719E 01	-0.500E 01		
0.729E 01	-0.452E 01		
0.739E 01	-0.406E 01		
0.749E 01	-0.361E 01		
0.759E 01	-0.319E 01		
0.769E 01	-0.278E 01		
0.779E 01	-0.238E 01		
0.789E 01	-0.200E 01		
0.799E 01	-0.163E 01		
0.809E 01	-0.128E 01		
0.819E 01	-0.947E 00		
0.829E 01	-0.620E 00		
0.839E 01	-0.304E 00		
0.849E 01	-0.787E-04		

Fig. 7.44

Scanned with OKEN Scanner

ELEMENTUL NR. 6 DE TIP PLI

ITA	STI	STIMIN	STIMAX
		0.254E 02	0.580E 02
0.450E 01	0.580E 02	I	I
0.459E 01	0.561E 02	I	I
0.469E 01	0.543E 02	I	I
0.479E 01	0.525E 02	I	I
0.489E 01	0.509E 02	I	I
0.499E 01	0.494E 02	I	I
0.509E 01	0.480E 02	I	I
0.519E 01	0.466E 02	I	I
0.529E 01	0.454E 02	I	I
0.539E 01	0.442E 02	I	I
0.549E 01	0.430E 02	I	I
0.559E 01	0.420E 02	I	I
0.569E 01	0.409E 02	I	I
0.579E 01	0.400E 02	I	I
0.589E 01	0.391E 02	I	I
0.599E 01	0.382E 02	I	I
0.609E 01	0.374E 02	I	I
0.619E 01	0.366E 02	I	I
0.629E 01	0.358E 02	I	I
0.639E 01	0.351E 02	I	I
0.649E 01	0.344E 02	I	I
0.659E 01	0.338E 02	I	I
0.669E 01	0.331E 02	I	I
0.679E 01	0.325E 02	I	I
0.689E 01	0.320E 02	I	I
0.699E 01	0.314E 02	I	I
0.709E 01	0.309E 02	I	I
0.719E 01	0.304E 02	I	I
0.729E 01	0.299E 02	I	I
0.739E 01	0.294E 02	I	I
0.749E 01	0.290E 02	I	I
0.759E 01	0.286E 02	I	I
0.769E 01	0.282E 02	I	I
0.779E 01	0.278E 02	I	I
0.789E 01	0.274E 02	I	I
0.799E 01	0.270E 02	I	I
0.809E 01	0.267E 02	I	I
0.819E 01	0.263E 02	I	I
0.829E 01	0.260E 02	I	I
0.839E 01	0.257E 02	I	I
0.849E 01	0.254E 02	I	I

Fig. 7.45

Scanned with OKEN Scanner

Se constată că încovoierea din cele trei aripioare de răcire este relativ mică, valorile tensiunilor pe cele două suprafeţe laterale ale fiecărei aripioare fiind practic aceleaşi.

7.3.3. *Reactor chimic (Structura 133)*

Spre deosebire de utilajele prezentate mai sus, toate realizate din table fasonate asamblate prin sudură, în figura 7.46 se prezintă un reactor chimic turnat, format dintr-o manta cilindrică (elementele *1* şi *5*), o flanşă pentru fixarea capacului (elementele *2* şi *3*), un inel de rezemare (elementul *4*) şi un fund semisferic (elementul *6*).

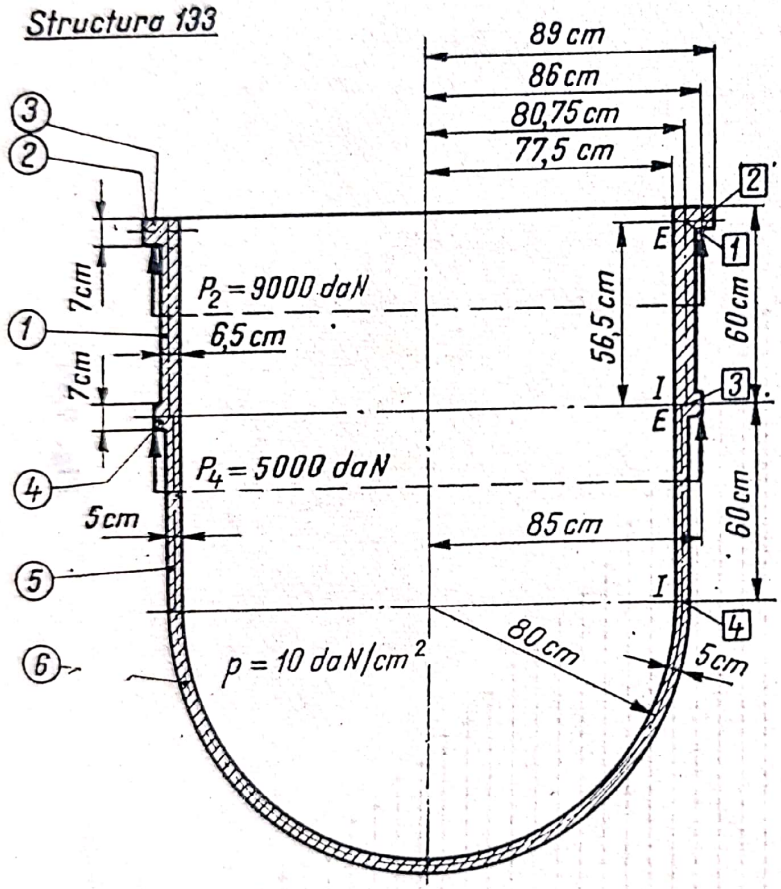


Fig. 7.46

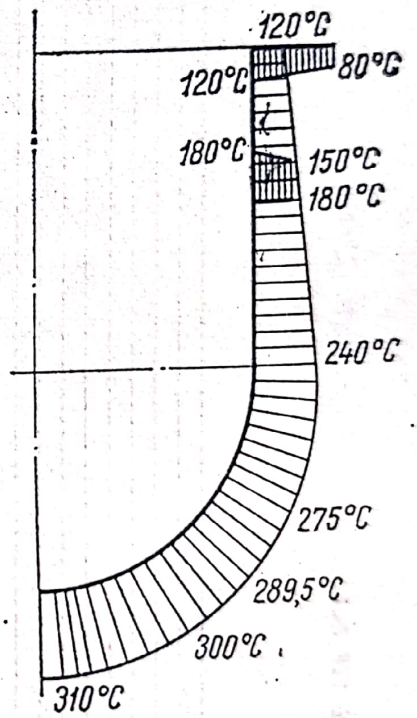


Fig. 7.47

Reactorul s-a considerat solicitat cu următorul sistem de sarcini :

— presiune interioară $p = 10$ daN/cm^2;

— forţa axială $P_2 = 9\,000$ daN, care solicită flanşa de fixare a capacului şi $P_4 = 5000$ daN, care solicită inelul de rezemare. S-a introdus pentru tronsonul superior al mantalei cilindrice (elementul *1*) forţa axială $P_1 = 2\,000$ daN, reprezentînd greutatea capacului reactorului (nereprezentată în fig. 7.46);

Scanned with OKEN Scanner

— variaţie liniară a temperaturii pe grosime : pentru elementele *5* şi *6* cu —40°C şi pentru elementul *1* cu —55°C. Reactorul fiind încălzit din exterior, variaţia temperaturii este negativă ;

— variaţie a temperaturii în lungul elementelor reactorului, aşa cum este reprezentată în figura 7.47. În tabelul 7.2 se dau expresiile funcţiilor de temperatură şi valorile coeficienţilor respectivi.

Tabelul 7.2

Legile de variaţie ale temperaturii pentru reactorul din figura 7.46

Elementul nr.	Funcţia de temperatură	Valorile coeficienţilor
1	$T(x) = a_0 + a_1 x$	$a_0 = 180\,;\ a_1 = -1{,}062$
2	$T(\rho) = a_0 + a_1 \rho$	$a_0 = 512\,;\ a_1 = -4{,}85$
3		$a_0 = 660\,;\ a_1 = -6$
4		
5	$T(x) = a_0 + a_1 x$	$a_0 = 240\,;\ a_1 = -1$
6	$T(\varphi) = a_0 - a_3 \cos\varphi$	$a_0 = 240\,;\ a_3 = -70$

Pentru constantele de material s-au considerat valorile :

$$[\mu] = 0{,}3\,;\ \alpha = 12 \cdot 10^{-6}\,;\ E = 1.$$

Lista instrucţiunilor pentru definirea structurii şi introducerea datelor (definite ca mărimi metrice) este reprodusă în figura 7.48.

```
* STRUCTURA NR. 133
  ELEMENTE
1 CIS 11
2 PLI 11
3 PLI 10
4 PLI 10
5 CIS 11
6 SFC X1
  LEGATURI
1 1E,2I
2 2E,3
3 1I,5E,4
4 5I,6
* DATE METRIC    (CM SI DAN)
CONSTANTE 1=0.3,2=12.E-6,3=1.
1 5=80.75,6=6.5,7=56.5,10=10,11=-2000,16=180,17=-1.062,20=-55
2 5=86,6=7,7=80.75,11=9000.,13=512,14=-4.85
3 5=89,6=7,7=86,13=512,14=-4.85
4 5=85,6=7,7=80,11=5000,13=660,14=-6
5 5=80,6=5,7=60,10=10,16=240,17=-1,20=-40
6 5=80,6=5,8=1.567000,10=10,13=240,16=-70,18=-40
* REZOLVA

**ATOI= 1
```

Fig. 7.48

Scanned with OKEN Scanner

Variațiile tensiunilor adimensionale în lungul generatoarei reactorului (elementele *1*, *5*, *6*) pentru suprafața interioară a acestuia, sînt reprezentate grafic în figura 7.49 pentru $\overline{\sigma}_{xi}$, $\overline{\sigma}_{\varphi i}$, și în figura 7.50 pentru $\overline{\sigma}_{\varphi i}$, $\overline{\sigma}_{\psi i}$. Din analiza acestora rezultă că tensiunile cele mai

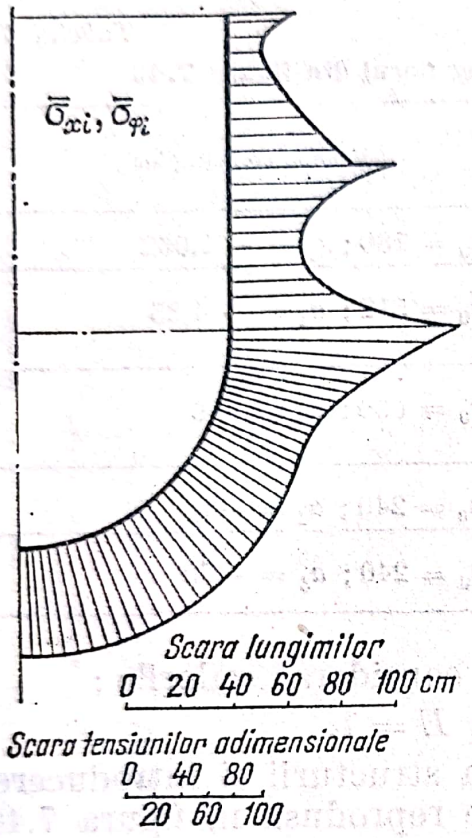


Fig. 7.49

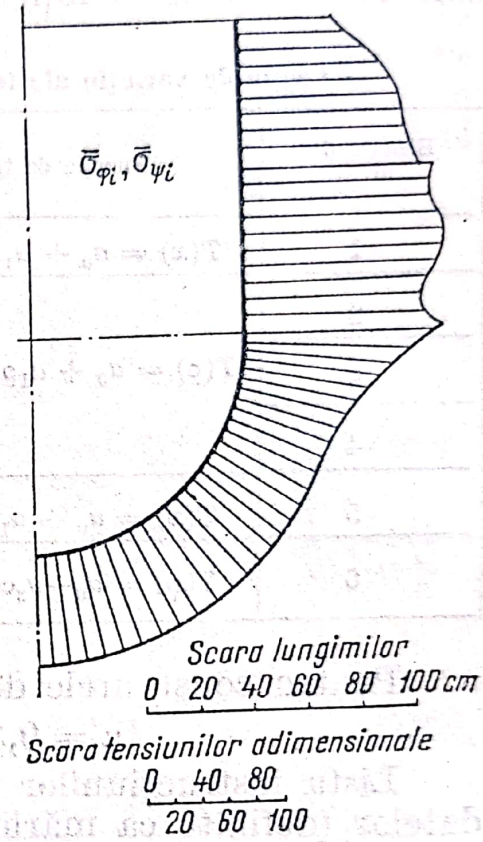


Fig. 7.50

mari sînt la îmbinarea fundului semisferic cu mantaua cilindrică. Pe suprafața exterioară tensiunile sînt mai mici.

7.4. Calculul rotoarelor și discurilor aflate în mișcare de rotație

O mare varietate de utilaje, ca de exemplu, pompe centrifuge, turbine, centrifuge de filtrare sau de separație etc, au ca organ principal un rotor sau un disc aflat în mișcare de rotație rapidă.

În astfel de cazuri solicitarea principală este dată de forțele de inerție ce rezultă din mișcarea de rotație, la care, de la caz la caz, se mai pot adăuga solicitări suplimentare produse de presiuni radiale sau axiale, sau încălziri neuniforme.

Scanned with OKEN Scanner

7.4.1. *Rotor de pompă centrifugă (Structura 151)*

Schema de calcul a unui rotor de pompă centrifugă, realizat prin turnare, se prezintă în figura 7.51. Structura se compune din 7 elemente de diverse tipuri. Datele s-au introdus ca mărimi metrice, pentru constantele de material considerîndu-se valorile : $\mu = 0{,}3$; $E = 2{,}1 \cdot 10^6$ daN/cm^2 ; $\gamma = 7{,}85 \cdot 10^{-3}$ daN/cm^3.

S-au considerat următoarele solicitări :

— forțele de inerție produse de mișcarea de rotație, pentru care s-a considerat viteza unghiulară $\omega = 100\pi$ rad/s, corespunzătoare unei turații $n = 3\,000$ rot/min ;

— presiunea $p = 300$ daN/cm^2, dintre butucul rotorului (elementele *1* și *2*) și arborele pompei ;

— pentru compensarea efectului axial al presiunii p, s-a introdus în elementele *1* și *2* o forță axială de compresiune $P = 8482$ daN (nereprezentată în fig. 7.51).

În partea superioară a figurii 7.52 este reprodusă lista completă a instrucțiunilor pentru definirea structurii și a datelor, după care urmează valorile tensiunilor adimensionale ; șirurile de valori, pentru toate elementele, se continuă în figurile 7.53 — —7.56, funcție de abscise metrice.

Tensiunea maximă este $\bar{\sigma}_{zi}$ din elementul *3*, pentru care s-a reprodus în figura 7.57 graficul variației respective.

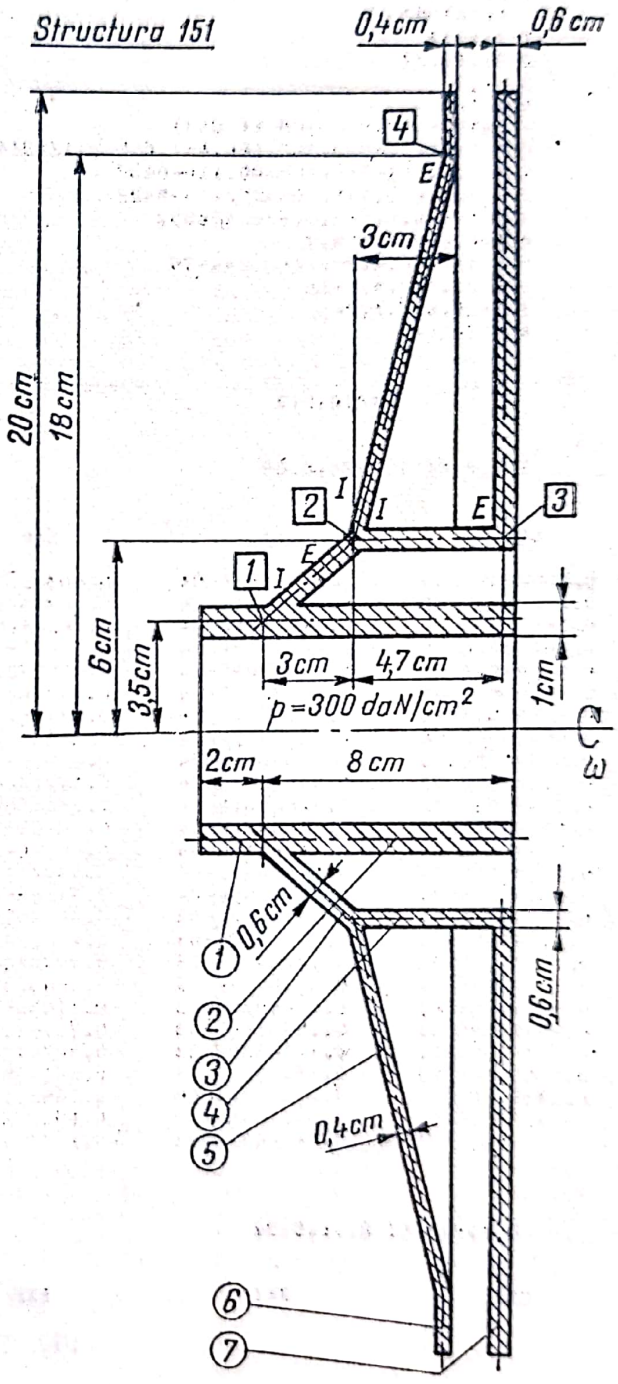


Fig. 7.51

```
* STRUCTURA NR. 151
  ELEMENTE
1 CIS 01
2 CIS 10
3 CON 11X
4 CIS 11
5 CON 11X
6 PLI 10
7 PLI 10
  LEGATURI
1 1,2,3I
2 4I,3E,5I
3 4E,7
4 6,5E
* DATE METRIC   (CM SI DAN)
CONSTANTE 1=0.3,3=2.1E6,4=7.85E-3,12=314.1593
1 5=3.5,6=1,7=2,10=300,11=-8482
2 5=3.5,6=1,7=8,10=300,11=-8482
3 5=6,6=0.6,7=3.5,8=0.876058
4 5=6,6=0.6,7=4.7
5 5=18,6=0.4,7=6,8=0.244979
6 5=20,6=0.4,7=18
7 5=20,6=0.6,7=6
* REZOLVA

          **AT01=18

1 T,M,PASI 0,26,0.08

   CSI              SXI              SXE              SFI              SFE

0.0000000E 00    0.6633305E-04    0.6633305E-04    0.5035[illegible]E-03    0.5035193E-03
0.8000001E-01    0.6635018E-04    0.6631591E-04    0.4974190E-03    0.4974086E-03
0.1600000E 00    0.6644624E-04    0.6621985E-04    0.4913423E-03    0.4912745E-03
0.2400000E 00    0.6668822E-04    0.6597787E-04    0.4853099E-03    0.4850969E-03
0.3199999E 00    0.6714309E-04    0.6552301E-04    0.4793426E-03    0.4788566E-03
0.3999999E 00    0.6787783E-04    0.6478827E-04    0.4734621E-03    0.4725352E-03
0.4799999E 00    0.6895932E-04    0.6370677E-04    0.4676908E-03    0.4661150E-03
0.5599999E 00    0.7045452E-04    0.6221157E-04    0.4620524E-03    0.4595795E-03
0.6399999E 00    0.7243016E-04    0.6023592E-04    0.4565721E-03    0.4529138E-03
0.7199997E 00    0.7495285E-04    0.5771324E-04    0.4512764E-03    0.4461044E-03
0.7999997E 00    0.7808901E-04    0.5457708E-04    0.4461934E-03    0.4391398E-03
0.8799996E 00    0.8190472E-04    0.5076137E-04    0.4413537E-03    0.4320107E-03
0.9599995E 00    0.8646564E-04    0.4620046E-04    0.4367896E-03    0.4247101E-03
0.1039999E 01    0.9183681E-04    0.4082927E-04    0.4325358E-03    0.4172335E-03
0.1119999E 01    0.9808255E-04    0.3459354E-04    0.4286295E-03    0.4095798E-03
0.1199999E 01    0.1052662E-03    0.2739979E-04    0.4251105E-03    0.4017505E-03
0.1279999E 01    0.1134502E-03    0.1921581E-04    0.4220213E-03    0.3937510E-03
0.1359999E 01    0.1226952E-03    0.9970806E-05    0.4194076E-03    0.3855903E-03
0.1439999E 01    0.1330604E-03   -0.3943133E-06    0.4173179E-03    0.3772815E-03
0.1519999E 01    0.1446026E-03   -0.1193653E-04    0.4158037E-03    0.3688419E-03
0.1599998E 01    0.1573766E-03   -0.2471050E-04    0.4149198E-03    0.3602937E-03
0.1679998E 01    0.1714338E-03   -0.3876776E-04    0.4147242E-03    0.3516637E-03
0.1759998E 01    0.1868229E-03   -0.5415683E-04    0.4152783E-03    0.3429844E-03
0.1839998E 01    0.2035882E-03   -0.7092217E-04    0.4166467E-03    0.3342936E-03
0.1919998E 01    0.2217699E-03   -0.8910389E-04    0.4188972E-03    0.3256351E-03
0.1999998E 01    0.2414032E-03   -0.1087371E-03    0.4221008E-03    0.3170587E-03


2 T,M,PASI 0,26,0.32

CSI              SXI              SXE              SFI              SFE
```

Fig. 7.52

Scanned with OKEN Scanner

0.0000000E 00	0.3909592E-03	-0.2582931E-03	0.4669679E-03	0.2721922E-03
0.3200000E 00	0.2777053E-03	-0.1450392E-03	0.4309520E-03	0.3041286E-03
0.6400001E 00	0.1883475E-03	-0.5568139E-04	0.4134663E-03	0.3402576E-03
0.9600000E 00	0.1213188E-03	0.1134724E-04	0.4092757E-03	0.3762842E-03
0.1279999E 01	0.7387752E-04	0.5878857E-04	0.4139763E-03	0.4094496E-03
0.1599999E 01	0.4273687E-04	0.8992923E-04	0.4240411E-03	0.4381988E-03
0.1919999E 01	0.2451442E-04	0.1081516E-03	0.4367822E-03	0.4618734E-03
0.2239999E 01	0.1602840E-04	0.1166376E-03	0.4502605E-03	0.4804432E-03
0.2559999E 01	0.1447249E-04	0.1181935E-03	0.4631701E-03	0.4942864E-03
0.2879999E 01	0.1749978E-04	0.1151663E-03	0.4747133E-03	0.5040132E-03
0.3199998E 01	0.2324080E-04	0.1094252E-03	0.4844821E-03	0.5103375E-03
0.3519998E 01	0.3027944E-04	0.1023866E-03	0.4923515E-03	0.5139836E-03
0.3839998E 01	0.3759855E-04	0.9506754E-04	0.4983864E-03	0.5156272E-03
0.4159997E 01	0.4451845E-04	0.8814764E-04	0.5027698E-03	0.5158585E-03
0.4479997E 01	0.5063094E-04	0.8203515E-04	0.5057452E-03	0.5151665E-03
0.4799997E 01	0.5572717E-04	0.7693893E-04	0.5075759E-03	0.5139395E-03
0.5119997E 01	0.5975260E-04	0.7291349E-04	0.5085152E-03	0.5124635E-03
0.5439996E 01	0.6275248E-04	0.6991361E-04	0.5087920E-03	0.5109403E-03
0.5759996E 01	0.6483039E-04	0.6783570E-04	0.5085974E-03	0.5094991E-03
0.6079996E 01	0.6612978E-04	0.6653631E-04	0.5080872E-03	0.5082092E-03
0.6399995E 01	0.6680679E-04	0.6585930E-04	0.5073726E-03	0.5070884E-03
0.6719995E 01	0.6702350E-04	0.6564259E-04	0.5065483E-03	0.5061340E-03
0.7039995E 01	0.6693440E-04	0.6573169E-04	0.5056642E-03	0.5053034E-03
0.7359994E 01	0.6669323E-04	0.6597286E-04	0.5047686E-03	0.5045525E-03
0.7679994E 01	0.6644362E-04	0.6622247E-04	0.5038855E-03	0.5038192E-03
0.7999994E 01	0.6632432E-04	0.6634177E-04	0.5030526E-03	0.5030578E-03

3 T,M,PASI 0,31,0.1

CSI	SXI	SXE	SPI	SPE
0.0000000E 00	-0.5303338E-03	0.3005483E-03	0.2192371E-03	0.4800543E-03
0.1000000E 00	-0.4089337E-03	0.2105738E-03	0.2224455E-03	0.4453909E-03
0.2000000E 00	-0.3048922E-03	0.1350823E-03	0.2211506E-03	0.4089608E-03
0.3000000E 00	-0.2165132E-03	0.7239609E-04	0.2163519E-03	0.3719925E-03
0.3999999E 00	-0.1421513E-03	0.2095916E-04	0.2088949E-03	0.3354286E-03
0.4999999E 00	-0.8023162E-04	-0.2066294E-04	0.1994885E-03	0.2999727E-03
0.5999999E 00	-0.2927545E-04	-0.5377767E-04	0.1887223E-03	0.2661340E-03
0.6999998E 00	0.1208625E-04	-0.7956616E-04	0.1770827E-03	0.2342666E-03
0.7999997E 00	0.4511403E-04	-0.9909187E-04	0.1649649E-03	0.2045946E-03
0.8999996E 00	0.7094963E-04	-0.1133006E-03	0.1526873E-03	0.1772442E-03
0.9999995E 00	0.9062288E-04	-0.1230316E-03	0.1405025E-03	0.1522638E-03
0.1099999E 01	0.1050560E-03	-0.1290242E-03	0.1286063E-03	0.1296402E-03
0.1199999E 01	0.1150677E-03	-0.1319258E-03	0.1171476E-03	0.1093157E-03
0.1299999E 01	0.1213809E-03	-0.1323003E-03	0.1062355E-03	0.9119951E-04
0.1399999E 01	0.1246307E-03	-0.1306363E-03	0.9594592E-04	0.7517619E-04
0.1499999E 01	0.1253703E-03	-0.1273539E-03	0.8632821E-04	0.6111671E-04
0.1599998E 01	0.1240797E-03	-0.1228132E-03	0.7740943E-04	0.4888189E-04
0.1699998E 01	0.1211732E-03	-0.1173200E-03	0.6919864E-04	0.3832824E-04
0.1799998E 01	0.1170050E-03	-0.1111325E-03	0.6169090E-04	0.2931224E-04
0.1899998E 01	0.1118768E-03	-0.1044669E-03	0.5486970E-04	0.2169216E-04
0.1999998E 01	0.1060441E-03	-0.9750358E-04	0.4871106E-04	0.1533203E-04
0.2099998E 01	0.9972069E-04	-0.9038987E-04	0.4318364E-04	0.1010079E-04
0.2199998E 01	0.9308465E-04	-0.8324651E-04	0.3825219E-04	0.5875271E-05
0.2299998E 01	0.8628288E-04	-0.7617019E-04	0.3387829E-04	0.2539877E-05
0.2399998E 01	0.7943503E-04	-0.6923729E-04	0.3002175E-04	-0.1286662E-07
0.2499998E 01	0.7263750E-04	-0.6250703E-04	0.2664165E-04	-0.1882155E-05
0.2599998E 01	0.6596662E-04	-0.5602400E-04	0.2369698E-04	-0.3159028E-05
0.2699997E 01	0.5948167E-04	-0.4982049E-04	0.2114737E-04	-0.3926683E-05
0.2799997E 01	0.5322779E-04	-0.4391886E-04	0.1895366E-04	-0.4260620E-05
0.2899997E 01	0.4723791E-04	-0.3833306E-04	0.1707813E-04	-0.4229173E-05
0.2999997E 01	0.4153526E-04	-0.3307048E-04	0.1548495E-04	-0.3893911E-05

Fig. 7.53

Scanned with OKEN Scanner

4 T,M,PASI 0,48,0.1

CSI	SXI	SXE	SFI	SFE
0.0000000E 00	0.2105178E-04	-0.2105178E-04	0.1214525E-04	-0.4858136E-06
0.1000000E 00	0.1972855E-04	-0.1972855E-04	0.1101859E-04	-0.8185342E-06
0.2000000E 00	0.1854584E-04	-0.1854584E-04	0.1003389E-04	-0.1093611E-05
0.3000000E 00	0.1751415E-04	-0.1751415E-04	0.9188313E-05	-0.1320173E-05
0.3999999E 00	0.1664241E-04	-0.1664241E-04	0.8479335E-05	-0.1506112E-05
0.4999999E 00	0.1593809E-04	-0.1593809E-04	0.7904795E-05	-0.1658060E-05
0.5999999E 00	0.1540726E-04	-0.1540726E-04	0.7462943E-05	-0.1781413E-05
0.6999998E 00	0.1505463E-04	-0.1505463E-04	0.7152517E-05	-0.1880259E-05
0.7999997E 00	0.1488359E-04	-0.1488359E-04	0.6972761E-05	-0.1957395E-05
0.8999996E 00	0.1489631E-04	-0.1489631E-04	0.6923447E-05	-0.2014340E-05
0.9999995E 00	0.1509366E-04	-0.1509366E-04	0.7004912E-05	-0.2051284E-05
0.1099999E 01	0.1547528E-04	-0.1547528E-04	0.7218043E-05	-0.2067124E-05
0.1199999E 01	0.1603951E-04	-0.1603951E-04	0.7564272E-05	-0.2059432E-05
0.1299999E 01	0.1678340E-04	-0.1678340E-04	0.8045566E-05	-0.2024475E-05
0.1399999E 01	0.1770266E-04	-0.1770266E-04	0.8664384E-05	-0.1957210E-05
0.1499999E 01	0.1879153E-04	-0.1879153E-04	0.9423660E-05	-0.1851256E-05
0.1599998E 01	0.2004282E-04	-0.2004282E-04	0.1032672E-04	-0.1698964E-05
0.1699998E 01	0.2144773E-04	-0.2144773E-04	0.1137727E-04	-0.1491361E-05
0.1799998E 01	0.2299575E-04	-0.2299575E-04	0.1257924E-04	-0.1218199E-05
0.1899998E 01	0.2467458E-04	-0.2467458E-04	0.1393677E-04	-0.8679717E-06
0.1999998E 01	0.2646998E-04	-0.2646998E-04	0.1545407E-04	-0.4279118E-06
0.2099998E 01	0.2836561E-04	-0.2836561E-04	0.1713529E-04	0.1159237E-06
0.2199998E 01	0.3034294E-04	-0.3034294E-04	0.1898445E-04	0.7786929E-06
0.2299998E 01	0.3238102E-04	-0.3238102E-04	0.2100527E-04	0.1576665E-05
0.2399998E 01	0.3445633E-04	-0.3445633E-04	0.2320097E-04	0.2527179E-05
0.2499998E 01	0.3654266E-04	-0.3654266E-04	0.2557419E-04	0.3648605E-05
0.2599998E 01	0.3861085E-04	-0.3861085E-04	0.2812670E-04	0.4960193E-05
0.2699997E 01	0.4062870E-04	-0.4062870E-04	0.3085928E-04	0.6482073E-05
0.2799997E 01	0.4256072E-04	-0.4256072E-04	0.3377148E-04	0.8235048E-05
0.2899997E 01	0.4436804E-04	-0.4436804E-04	0.3686139E-04	0.1024057E-04
0.2999997E 01	0.4600820E-04	-0.4600820E-04	0.4012537E-04	0.1252046E-04
0.3099997E 01	0.4743497E-04	-0.4743497E-04	0.4355784E-04	0.1509687E-04
0.3199997E 01	0.4859826E-04	-0.4859826E-04	0.4715101E-04	0.1799206E-04
0.3299997E 01	0.4944398E-04	-0.4944398E-04	0.5089441E-04	0.2122802E-04
0.3399997E 01	0.4991399E-04	-0.4991399E-04	0.5477491E-04	0.2482652E-04
0.3499997E 01	0.4994595E-04	-0.4994595E-04	0.5877618E-04	0.2880861E-04
0.3599997E 01	0.4947336E-04	-0.4947336E-04	0.6287836E-04	0.3319434E-04
0.3699996E 01	0.4842547E-04	-0.4842547E-04	0.6705785E-04	0.3800257E-04
0.3799996E 01	0.4672734E-04	-0.4672734E-04	0.7128677E-04	0.4325038E-04
0.3899996E 01	0.4430013E-04	-0.4430013E-04	0.7553290E-04	0.4895283E-04
0.3999996E 01	0.4106084E-04	-0.4106084E-04	0.7975906E-04	0.5512256E-04
0.4099996E 01	0.3692292E-04	-0.3692292E-04	0.8392280E-04	0.6176906E-04
0.4199996E 01	0.3179634E-04	-0.3179634E-04	0.8797613E-04	0.6889832E-04
0.4299995E 01	0.2558777E-04	-0.2558777E-04	0.9186523E-04	0.7651257E-04
0.4399994E 01	0.1820167E-04	-0.1820167E-04	0.9552988E-04	0.8460889E-04
0.4499994E 01	0.9539924E-05	-0.9539924E-05	0.9890334E-04	0.9317939E-04
0.4599993E 01	-0.4968680E-06	0.4968680E-06	0.1019119E-03	0.1022100E-03
0.4699993E 01	-0.1200908E-04	0.1200908E-04	0.1044747E-03	0.1116802E-03

5 T,M,PASI 0,31,0.1

CSI	SXI	SXE	SFI	SFE
0.0000000E 00	0.4416320E-04	-0.2896602E-04	0.1622954E-04	-0.2675552E-05
0.1000000E 00	0.3900056E-04	-0.2701740E-04	0.1952108E-04	-0.3989006E-05

Fig. 7.54

Scanned with OKEN Scanner

0.2000000E 00	0.3500497E-04	-0.2584810E-04	0.2304964E-04	-0.3978814E-05
0.3000000E 00	0.3204838E-04	-0.2529346E-04	0.2680369E-04	-0.2996306E-05
0.3999999E 00	0.2998244E-04	-0.2521663E-04	0.3076668E-04	-0.1301763E-05
0.4999999E 00	0.2865545E-04	-0.2550032E-04	0.3491977E-04	0.9172937E-06
0.5999999E 00	0.2792182E-04	-0.2604230E-04	0.3924341E-04	0.3529304E-05
0.6999998E 00	0.2764706E-04	-0.2675281E-04	0.4371811E-04	0.6444655E-05
0.7999997E 00	0.2770995E-04	-0.2755286E-04	0.4832458E-04	0.9604209E-05
0.8999996E 00	0.2800284E-04	-0.2837288E-04	0.5304387E-04	0.1297072E-04
0.9999995E 00	0.2843133E-04	-0.2915173E-04	0.5785698E-04	0.1652190E-04
0.1099999E 01	0.2891318E-04	-0.2983587E-04	0.6274481E-04	0.2024545E-04
0.1199999E 01	0.2937734E-04	-0.3037864E-04	0.6768789E-04	0.2413521E-04
0.1299999E 01	0.2976272E-04	-0.3073971E-04	0.7266621E-04	0.2818839E-04
0.1399999E 01	0.3001728E-04	-0.3088464E-04	0.7765907E-04	0.3240349E-04
0.1499999E 01	0.3009704E-04	-0.3078454E-04	0.8264512E-04	0.3677886E-04
0.1599998E 01	0.2996548E-04	-0.3041586E-04	0.8760234E-04	0.4131152E-04
0.1699998E 01	0.2959288E-04	-0.2976030E-04	0.9250803E-04	0.4599652E-04
0.1799998E 01	0.2895591E-04	-0.2880471E-04	0.9733908E-04	0.5082632E-04
0.1899998E 01	0.2803739E-04	-0.2754112E-04	0.1020721E-03	0.5579063E-04
0.1999998E 01	0.2682603E-04	-0.2596684E-04	0.1066839E-03	0.6087599E-04
0.2099998E 01	0.2531641E-04	-0.2408458E-04	0.1111510E-03	0.6606573E-04
0.2199998E 01	0.2350888E-04	-0.2190256E-04	0.1154510E-03	0.7134010E-04
0.2299998E 01	0.2140966E-04	-0.1943469E-04	0.1195621E-03	0.7667623E-04
0.2399998E 01	0.1903082E-04	-0.1670069E-04	0.1234639E-03	0.8204820E-04
0.2499998E 01	0.1639056E-04	-0.1372646E-04	0.1271377E-03	0.8742713E-04
0.2599998E 01	0.1351308E-04	-0.1054390E-04	0.1305666E-03	0.9278160E-04
0.2699997E 01	0.1042896E-04	-0.7191393E-05	0.1337364E-03	0.9807765E-04
0.2799997E 01	0.7174903E-05	-0.3713550E-05	0.1366359E-03	0.1032793E-03
0.2899997E 01	0.3794258E-05	-0.1616834E-06	0.1392569E-03	0.1083486E-03
0.2999997E 01	0.3366931E-06	0.3406521E-05	0.1415953E-03	0.1132460E-03

6 T,M,PASI 18,26,0.08

ITA	SRI	SRE	STI	STE
0.1800000E 02	0.3464420E-05	0.3940011E-06	0.1124275E-03	0.1416773E-03
0.1808000E 02	0.3403577E-05	0.4758381E-06	0.1117828E-03	0.1408900E-03
0.1815999E 02	0.3335638E-05	0.5487096E-06	0.1111420E-03	0.1401084E-03
0.1823999E 02	0.3260702E-05	0.6127346E-06	0.1105051E-03	0.1393325E-03
0.1831999E 02	0.3178854E-05	0.6680314E-06	0.1098720E-03	0.1385622E-03
0.1839999E 02	0.3090180E-05	0.7147185E-06	0.1092426E-03	0.1377975E-03
0.1847999E 02	0.2994767E-05	0.7529091E-06	0.1086168E-03	0.1370381E-03
0.1855998E 02	0.2892692E-05	0.7827160E-06	0.1079945E-03	0.1362839E-03
0.1863998E 02	0.2784036E-05	0.8042480E-06	0.1073757E-03	0.1355349E-03
0.1871998E 02	0.2668881E-05	0.8176133E-06	0.1067603E-03	0.1347910E-03
0.1879998E 02	0.2547306E-05	0.8229160E-06	0.1061482E-03	0.1340520E-03
0.1887998E 02	0.2419374E-05	0.8202596E-06	0.1055392E-03	0.1333177E-03
0.1895998E 02	0.2285169E-05	0.8097457E-06	0.1049334E-03	0.1325882E-03
0.1903997E 02	0.2144758E-05	0.7914705E-06	0.1043307E-03	0.1318634E-03
0.1911997E 02	0.1998211E-05	0.7655314E-06	0.1037310E-03	0.1311431E-03
0.1919997E 02	0.1845598E-05	0.7320220E-06	0.1031342E-03	0.1304272E-03
0.1927997E 02	0.1686990E-05	0.6910371E-06	0.1025403E-03	0.1297157E-03
0.1935997E 02	0.1522450E-05	0.6426652E-06	0.1019492E-03	0.1290084E-03
0.1943996E 02	0.1352042E-05	0.5869949E-06	0.1013609E-03	0.1283054E-03
0.1951996E 02	0.1175844E-05	0.5241188E-06	0.1007752E-03	0.1276063E-03
0.1959996E 02	0.9938946E-06	0.4541134E-06	0.1001921E-03	0.1269113E-03
0.1967996E 02	0.8062634E-06	-0.3770650E-06	0.9961164E-04	0.1262202E-03
0.1975996E 02	0.6130161E-06	0.2930580E-06	0.9903364E-04	0.1255330E-03
0.1983995E 02	0.4142054E-06	0.2021697E-06	0.9845801E-04	0.1248494E-03
0.1991995E 02	0.2098888E-06	0.1044787E-06	0.9788479E-04	0.1241696E-03
0.1999995E 02	0.1277838E-09	0.6458698E-10	0.9731389E-04	0.1234933E-03

Fig. 7.55

Scanned with OKEN Scanner

```
7 T,M,PASI 6,29,0.5
```

ITA	SRI	SRE	STI	STE
0.6000000E 01	0.2429348E-04	0.2735196E-06	0.9737747E-04	0.1261486E-03
0.6500000E 01	0.2855426E-04	0.8438952E-05	0.9158886E-04	0.1164553E-03
0.6999999E 01	0.3165725E-04	0.1464017E-04	0.8683581E-04	0.1086041E-03
0.7499998E 01	0.3388065E-04	0.1936308E-04	0.8284015E-04	0.1021089E-03
0.7999997E 01	0.3541856E-04	0.2294664E-04	0.7940772E-04	0.9663082E-04
0.8499996E 01	0.3640972E-04	0.2563318E-04	0.7639985E-04	0.9192759E-04
0.8999994E 01	0.3695543E-04	0.2759964E-04	0.7371517E-04	0.8782216E-04
0.9499992E 01	0.3713105E-04	0.2897765E-04	0.7127835E-04	0.8418294E-04
0.9999990E 01	0.3699363E-04	0.2966680E-04	0.6903237E-04	0.8091039E-04
0.1049998E 02	0.3658690E-04	0.3034352E-04	0.6693348E-04	0.7792806E-04
0.1099998E 02	0.3594494E-04	0.3046723E-04	0.6494756E-04	0.7517641E-04
0.1149998E 02	0.3509454E-04	0.3028494E-04	0.6304789E-04	0.7260969E-04
0.1199998E 02	0.3405709E-04	0.2983378E-04	0.6121303E-04	0.7018753E-04
0.1249998E 02	0.3284971E-04	0.2914376E-04	0.5942588E-04	0.6788304E-04
0.1299997E 02	0.3148637E-04	0.2823922E-04	0.5767246E-04	0.6567081E-04
0.1349997E 02	0.2997843E-04	0.2714007E-04	0.5594141E-04	0.6353098E-04
0.1399997E 02	0.2833531E-04	0.2586273E-04	0.5422331E-04	0.6144710E-04
0.1449997E 02	0.2656402E-04	0.2442083E-04	0.5251036E-04	0.5940556E-04
0.1499997E 02	0.2467349E-04	0.2282579E-04	0.5079603E-04	0.5739494E-04
0.1549996E 02	0.2266681E-04	0.2108718E-04	0.4907483E-04	0.5540566E-04
0.1599996E 02	0.2054943E-04	0.1921314E-04	0.4734210E-04	0.5342959E-04
0.1649996E 02	0.1832531E-04	0.1721057E-04	0.4559390E-04	0.5145984E-04
0.1699996E 02	0.1599782E-04	0.1508538E-04	0.4382683E-04	0.4949047E-04
0.1749995E 02	0.1356987E-04	0.1284263E-04	0.4203800E-04	0.4751644E-04
0.1799995E 02	0.1104399E-04	0.1048673E-04	0.4022490E-04	0.4553336E-04
0.1849995E 02	0.8422301E-05	0.8021434E-05	0.3838534E-04	0.4353741E-04
0.1899994E 02	0.5706749E-05	0.5450088E-05	0.3651747E-04	0.4152533E-04
0.1949994E 02	0.2898960E-05	0.2775557E-05	0.3461958E-04	0.3949419E-04
0.1999993E 02	0.3740154E-09	0.3589265E-09	0.3269026E-04	0.3744148E-04

Fig. 7.56

Scanned with OKEN Scanner

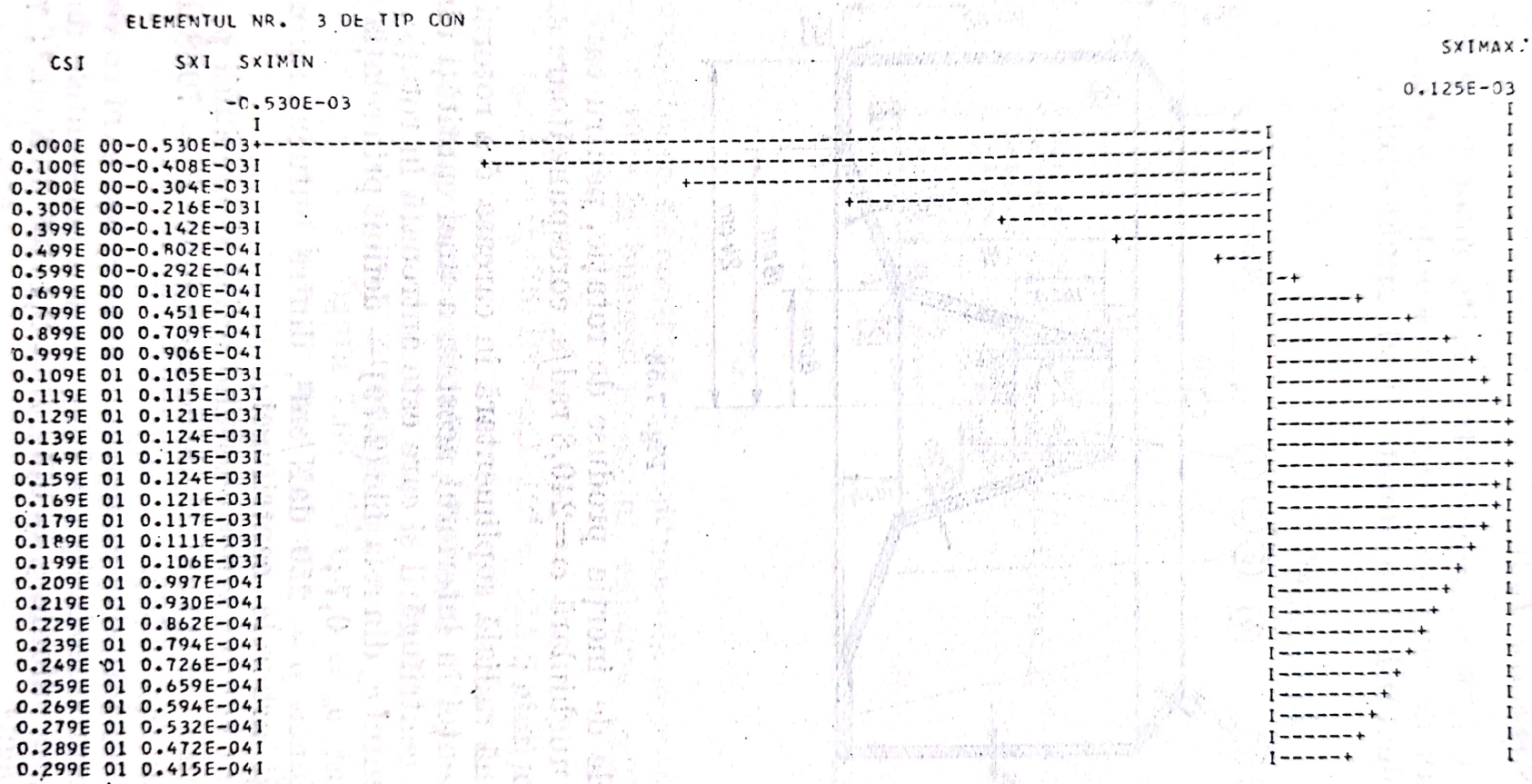


Fig. 7.57

Scanned with OKEN Scanner

7.4.2. *Rotor de centrifugă de filtrare sau de separare (Structura 152)*

În figura 7.58 s-a reprezentat schiţa rotorului unei centrifuge de filtrare sau de separare, care s-a descompus pentru calcul în 6 elemente, solicitările considerate fiind următoarele :

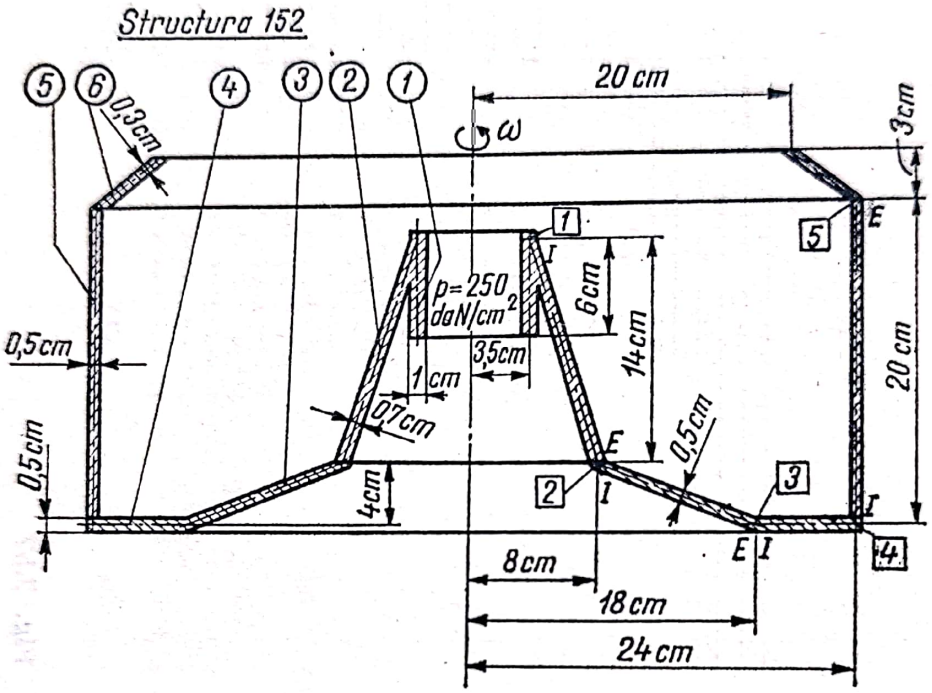


Fig. 7.58

— forţele de inerţie produse de rotaţie, pentru care s-a considerat viteza unghiulară $\omega = 240{,}8$ rad/s, corespunzătoare unei turaţii $n = 2\,300$ rot/min ;

— sarcină radială suplimentară în carcasa *5* a rotorului, ca urmare a existenţei în interiorul acesteia a unei cantităţi din materia ce se supune centrifugării şi care este antrenată în rotaţie. În acest scop, coeficientul c_ω din relaţiile (2.79) — definit prin relaţia (2.62″) — s-a considerat $c_\omega = 0{,}7$;

— presiunea $p = 250$ daN/cm², dintre butucul rotorului (elementul *1*) şi arborele centrifugei ;

— pentru compensarea efectului axial al presiunii p, s-a introdus în butucul *1* o forţă axială de compresiune $P = 7068$ daN (nereprezentată în fig. 7.58).

Datele s-au introdus ca mărimi metrice, aşa cum se vede în instrucţiunile reproduse în figura 7.59, pentru constantele de material considerîndu-se valorile $\mu = 0{,}3$; $E = 2{,}1 \cdot 10^6$ daN/cm² ; $\gamma = 7{,}85 \times 10^{-3}$ daN/cm³.

În tabelul 7.3 se dau valorile tensiunilor adimensionale maxime (în valoare absolută) pentru fiecare element al rotorului din figura 7.58, pentru direcţia longitudinală şi circumferenţială, pe suprafaţa interioară şi exterioară. De asemenea se precizează şi valorile absci-

```
* STRUCTURA NR. 152
  ELEMENTE
1 CIS 01
2 CON X11
3 CON X11
4 PLI 11
5 CIS 11
6 CON X10
  LEGATURI
1 1,2I
2 2E,3I
3 3E,4I
4 4E,5I
5 5E,6
* DATE METRIC   (CM SI DAN)
CONSTANTE 1=0.3,3=2.1E6,4=7.85E-3,12=240.8
1 5=3.5,6=1,7=6,10=250,11=-7068
2 5=8,6=0.7,7=3.5,8=1.259798
3 5=18,6=0.5,7=8,8=0.380506
4 5=24,6=0.5,7=18
5 5=24,6=0.5,7=20,14=0.7
6 5=24,6=0.3,7=20,8=0.643501
* REZOLVA

          **ATOI= 3
```

Fig. 7.59

selor corespunzătoare. Se constată că tensiunea adimensională maximă este $\overline{\sigma}_{\varphi e}=0{,}436\cdot10^{-3}$ în butucul rotorului, valoarea reală a acesteia fiind

$$\sigma_{\varphi e} = \overline{\sigma}_{\varphi e}\cdot E = 0{,}436\cdot10^{-3}\cdot2{,}1\cdot10^{6} = 915{,}6 \text{ daN/cm}^2.$$

7.4.3. *Rotor cu grosime variabilă (Structura 153)*

Se consideră rotorul cu suprafaţa mediană curbă şi grosimea variabilă, reprezentat în figura 7.60. Forma suprafeţei mediane şi grosimea pot fi definite într-un mod oarecare, de exemplu, tabelar. Pentru calculul tensiunilor, porţiunea curbă a rotorului se aproximează ca în figura 7.61, printr-o placă plană inelară (elementul *2*) şi prin trei învelişuri conice (elementele *3*, *4*, *5*). Butucul *1* şi flanşa completează structura ce se calculează.

Observaţie. Dacă este necesar să se determine foarte exact starea de tensiune din rotor, porţiunea curbă a acestuia se va aproxima printr-o divizare mai fină, într-un număr mai mare de elemente conice cu grosimea constantă.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 7.3

Valorile tensiunilor adimensionale maxime pentru rotorul de centrifugă din figura 7.58

Elementul nr.	Notaţii	Direcţia longitudinală (radială)		Direcţia circumferenţială	
		Interior	Exterior	Interior	Exterior
1	$\bar{\sigma}_{xi}$, $\bar{\sigma}_{xe}$, $\bar{\sigma}_{\varphi i}$, $\bar{\sigma}_{\varphi e}$	$0{,}251 \cdot 10^{-3}$	$-0{,}14 \cdot 10^{-3}$	$0{,}425 \cdot 10^{-3}$	$0{,}436 \cdot 10^{-3}$
	x	6	6	1,2	2,6
2	$\bar{\sigma}_{xi}$, $\bar{\sigma}_{xe}$, $\bar{\sigma}_{\psi i}$, $\bar{\sigma}_{\psi e}$,	$-0{,}427 \cdot 10^{-3}$	$0{,}372 \cdot 10^{-3}$	$0{,}133 \cdot 10^{-3}$	$0{,}322 \cdot 10^{-3}$
	x_1	0	0	0,5	0
3	$\bar{\sigma}_{xi}$, $\bar{\sigma}_{xe}$, $\bar{\sigma}_{\psi i}$, $\bar{\sigma}_{\psi e}$	$-0{,}665 \cdot 10^{-4}$	$0{,}826 \cdot 10^{-4}$	$0{,}116 \cdot 10^{-3}$	$0{,}139 \cdot 10^{-3}$
	x_1	4	4	3,5	4
4	$\bar{\sigma}_{\rho i}$, $\bar{\sigma}_{\rho e}$, $\bar{\sigma}_{ti}$, $\bar{\sigma}_{te}$	$-0{,}659 \cdot 10^{-4}$	$0{,}832 \cdot 10^{-4}$	$0{,}114 \cdot 10^{-3}$	$0{,}141 \cdot 10^{-3}$
	ρ	18	18	18	18
5	$\bar{\sigma}_{xi}$, $\bar{\sigma}_{xe}$, $\sigma_{\varphi i}$, $\bar{\sigma}_{\varphi e}$	$0{,}613 \cdot 10^{-4}$	$-0{,}613 \cdot 10^{-4}$	$0{,}221 \cdot 10^{-3}$	$0{,}228 \cdot 10^{-3}$
	x	0	0	9	5,5
6	$\bar{\sigma}_{xi}$, $\bar{\sigma}_{xe}$, $\bar{\sigma}_{\psi i}$, $\bar{\sigma}_{\psi e}$	$-0{,}595 \cdot 10^{-4}$	$0{,}651 \cdot 10^{-4}$	$0{,}152 \cdot 10^{-3}$	$0{,}182 \cdot 10^{-3}$
	x_1	3	3	2,7	3

Scanned with OKEN Scanner

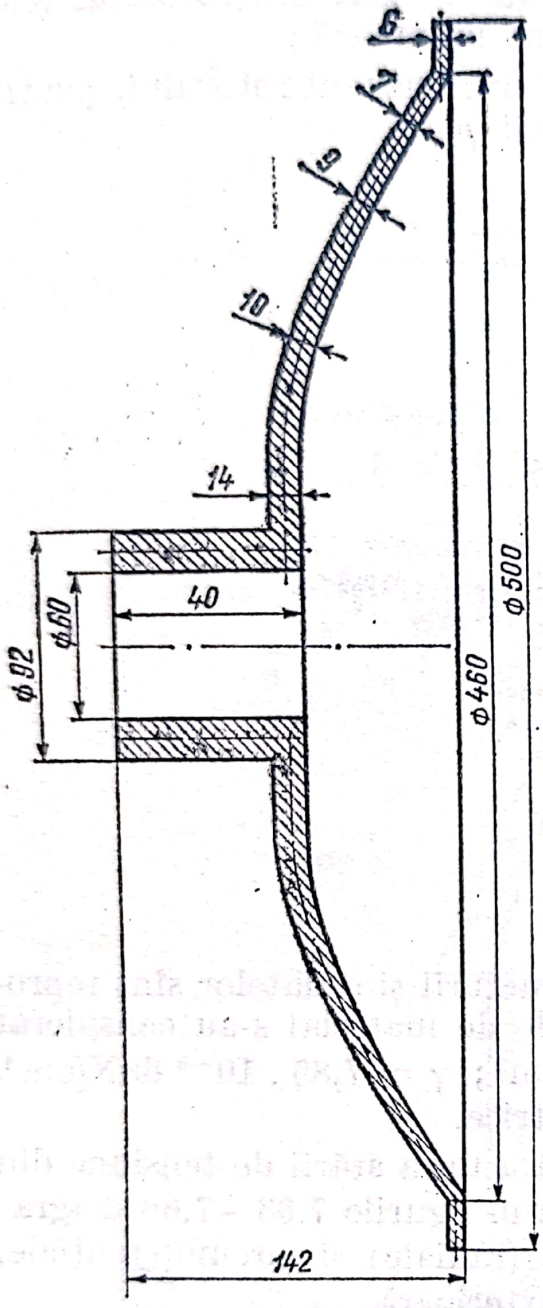


Fig. 7.60

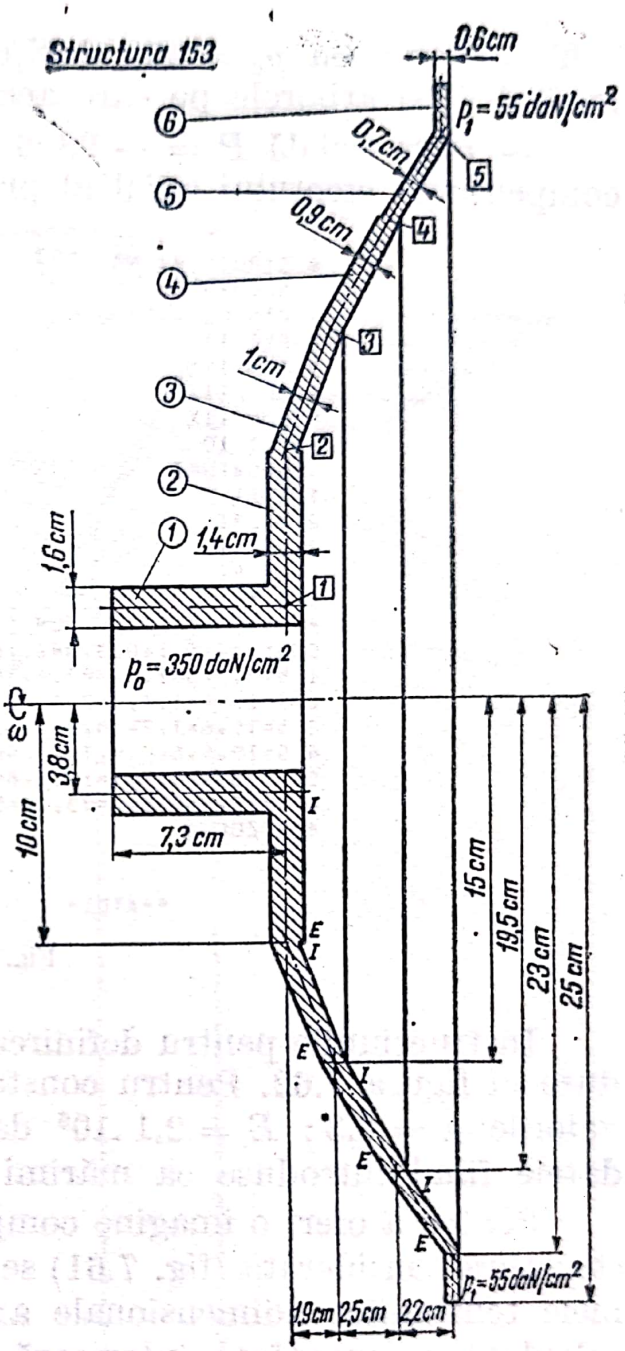


Fig. 7.61

Rotorul s-a presupus solicitat de către următorul sistem de sarcini :

— forţele de inerţie ce apar ca urmare a mişcării de rotaţie, pentru care s-a considerat viteza unghiulară $\omega = 298{,}45$ rad/s, corespunzătoare unei turaţii $n = 2850$ rot/min ;

— presiunea axială $p_1 = 55$ daN/cm², care acţionează asupra flanşei *6* ;

— presiunea $p_0 = 350$ daN/cm², dintre butucul rotorului (elementul *1*) și arborele pe care acesta se montează;

— forța axială $P = -9896$ daN din butucul rotorului, pentru compensarea efectului axial al presiunii p_0.

```
* STRUCTURA NR. 153
  ELEMENTE
1 CIS 01
2 PLI 11
3 CON 11X
4 CON 11X
5 CON 11X
6 PLI 10
  LEGATURI
1 1,2I
2 2E,3I
3 3E,4I
4 4E,5I
5 6,5E
* DATE METRIC   (CM SI DAN)
CONSTANTE 1=0.3,3=2.1E6,4=7.85E-3,12=298.45
1 5=3.8,6=1.6,7=7.3,10=350,11=-9896
2 5=10,6=1.4,7=3.8
3 5=15,6=1,7=10,8=0.363147
4 5=19.5,6=0.9,7=15,8=0.507098
5 5=23,6=0.7,7=19.5,8=0.561163
6 5=25,6=0.6,7=23,10=55
* REZOLVA

**ATOI= 1
```

Fig. 7.62

Instrucțiunile pentru definirea structurii și a datelor sînt reproduse în figura **7.62.** Pentru constantele de material s-au considerat valorile $\mu = 0{,}3$; $E = 2{,}1 \cdot 10^6$ daN/cm²; $\gamma = 7{,}85 \cdot 10^{-3}$ daN/cm³, datele fiind introduse ca mărimi metrice.

Pentru a oferi o imagine completă asupra stării de tensiune din structura considerată (fig. 7.61) se dau în figurile 7.63—7.66 diagramele tensiunilor adimensionale axiale (radiale) și circumferențiale, calculate pe suprafața interioară și exterioară.

Din analiza acestora rezultă că tensiunea adimensională maximă apare în elementul *6*, la îmbinarea cu elementul *5* și este $\bar{\sigma}_{r_i} = 893 \cdot 10^{-6}$.

7.4.4. *Rotor de turbină cu gaz (Structura 155)*

Rotoarele turbinelor și în special ale celor cu gaz, au forma unui disc plan de grosime constantă sau variabilă care se fixează pe arbore cu un butuc cilindric, ca cel din figura 7.67.

Scanned with OKEN Scanner

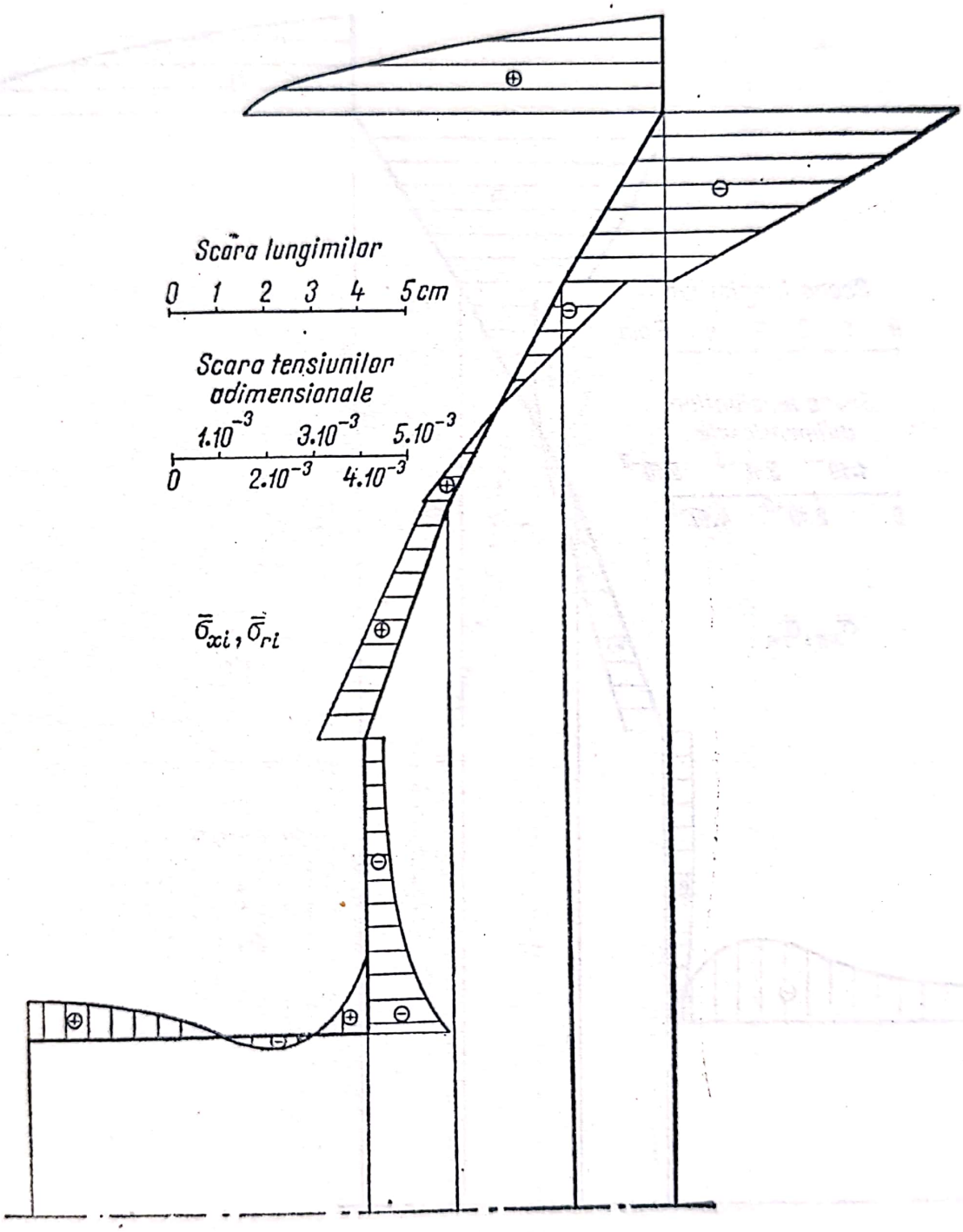


Fig. 7.63

Scanned with OKEN Scanner

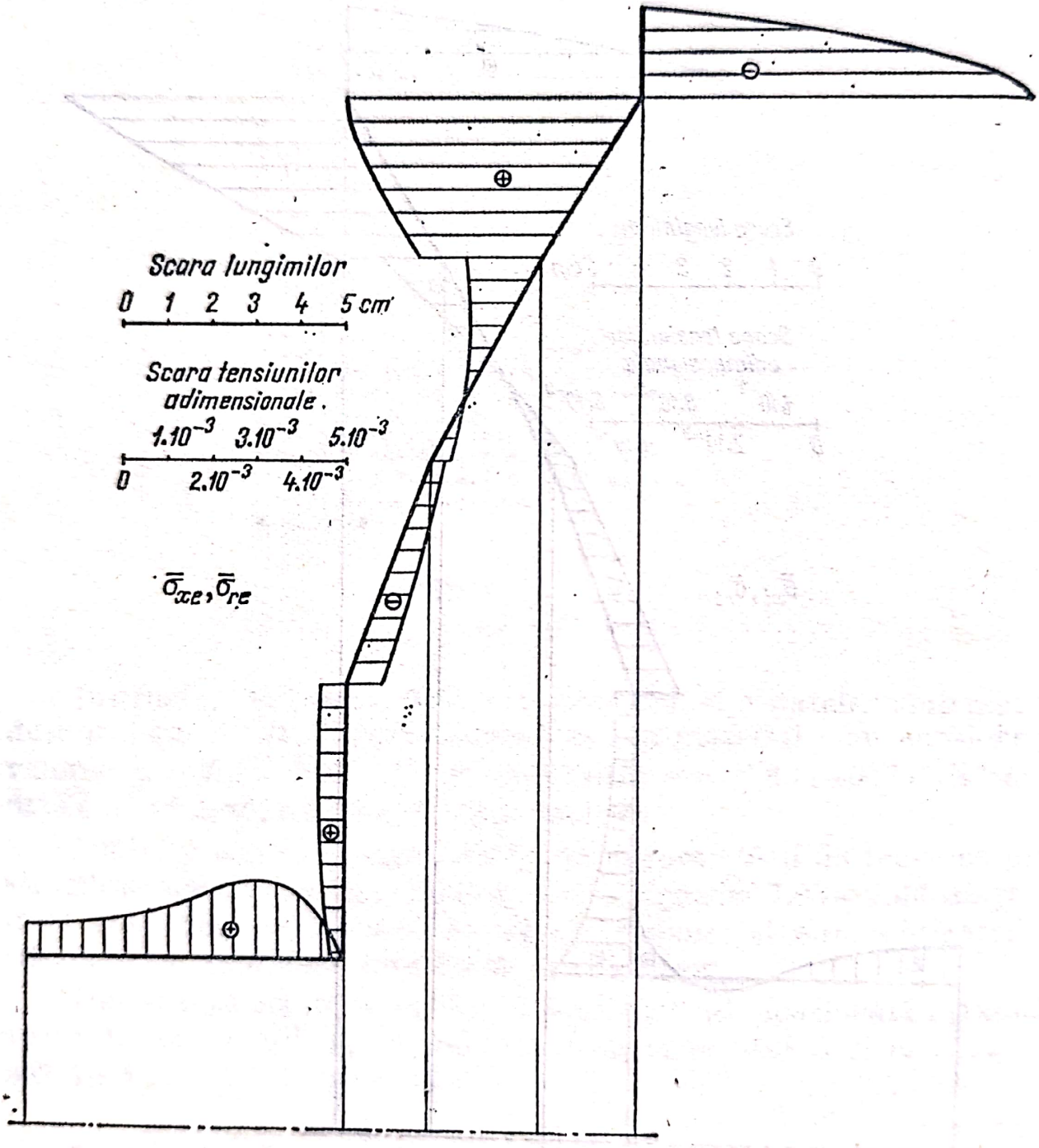


Fig. 7.64

Scanned with OKEN Scanner

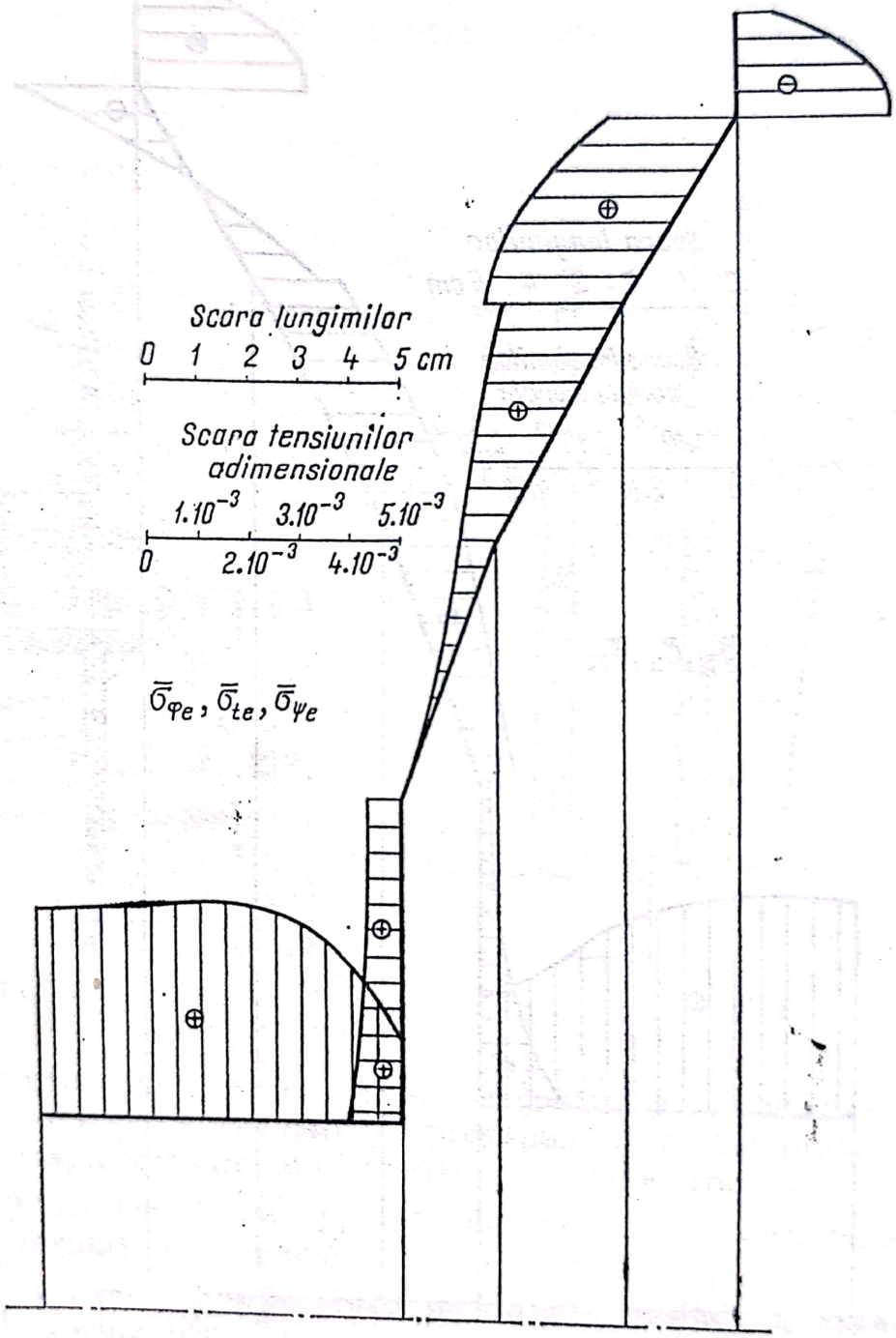


Fig. 7.65

Scanned with OKEN Scanner

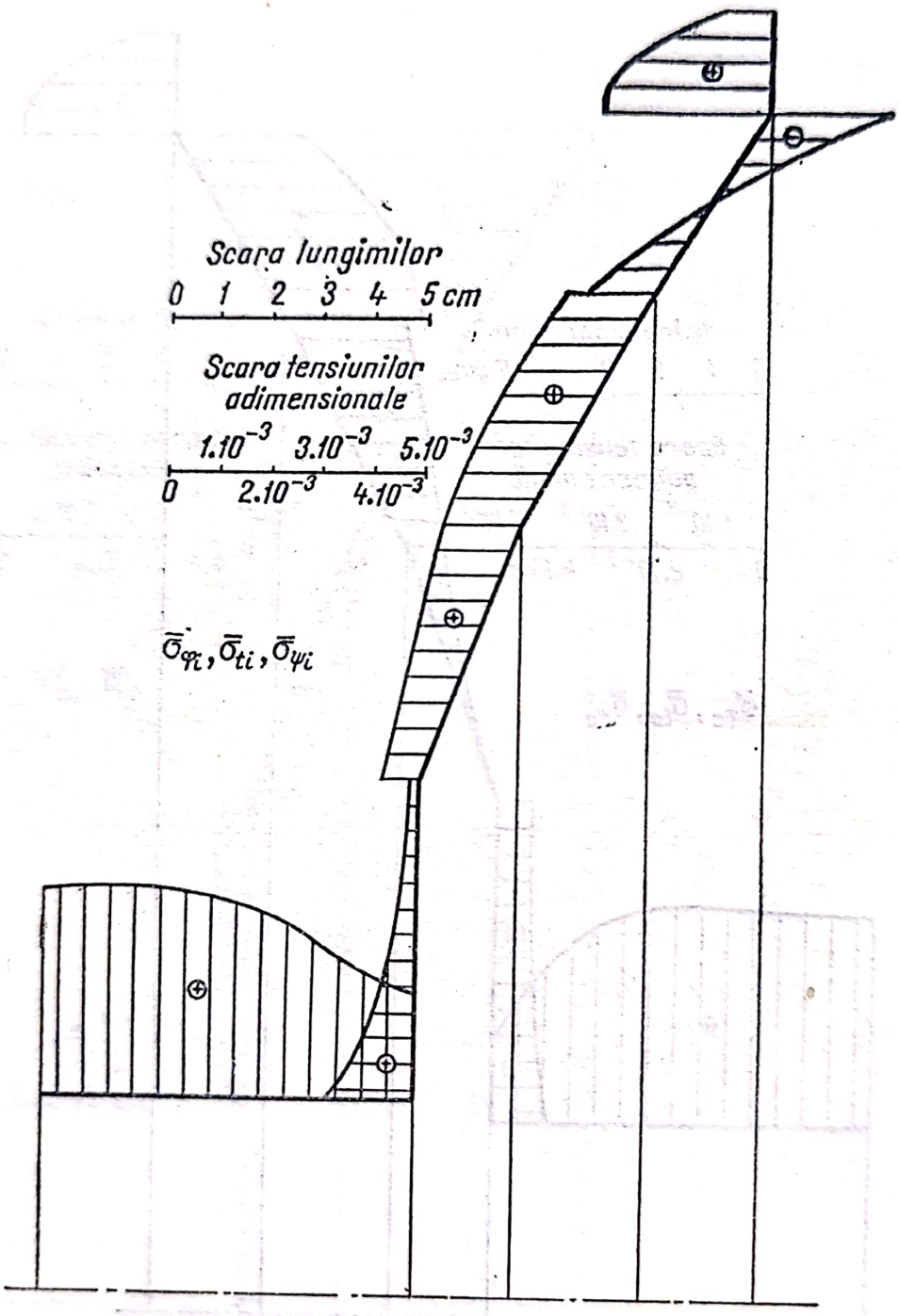


Fig. 7.66

Scanned with OKEN Scanner

Variaţia în trepte a grosimii poate fi ca atare, sau poate rezulta ca aproximare a unui disc a cărui grosime variază continuu, după o lege oarecare.

Calculul tensiunilor adimensionale pentru rotorul din figura 7.67 s-a făcut considerînd că acesta este supus următoarelor solicitări :

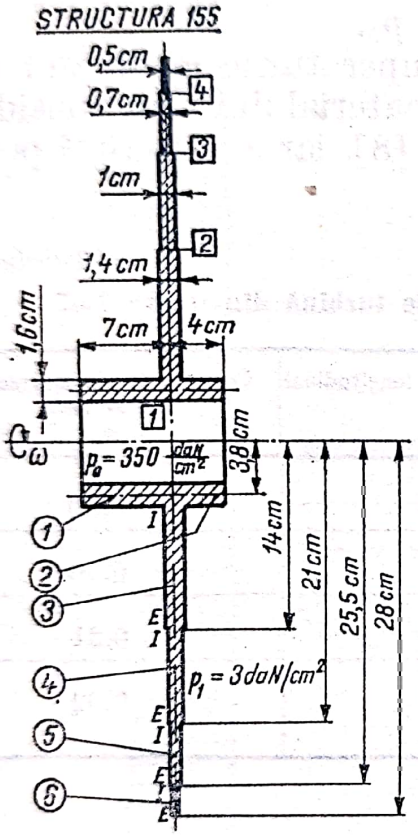


Fig. 7.67

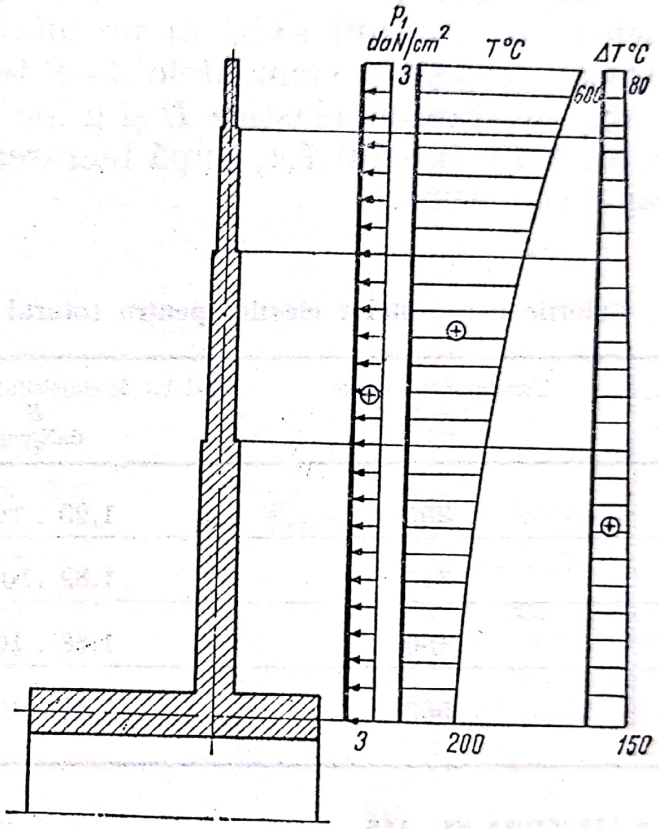


Fig. 7.68

— forţele de inerţie radiale — centrifuge — produse de mişcarea de rotaţie, pentru care s-a presupus viteza unghiulară $\omega = 314$ rad/s, corespunzătoare unei turaţii $n = 3\,000$ rot/min ;

— presiunea axială $p_1 = 3$ daN/cm², care acţionează asupra discului format din elementele *3—6* (fig. 7.68) ;

— variaţie a temperaturii pe direcţia radială a discului după o lege de forma (fig. 7.68)

$$T(\rho) = a_0 + a_2 \rho^2,$$

în care : $a_0 = 192{,}5$ şi $a_2 = 0{,}52$ cm^{-2} ;

-- variație a temperaturii pe grosimea discului, diferența de temperatură ΔT fiind o funcție de forma

$$\Delta T(\rho) = b_0 + b_2\rho^2,$$

în care: $b_0 = 151{,}3$ și $a_2 = -0{,}091$ cm^{-2} (fig. 7.68);

— presiunea $p_0 = 350$ daN/cm^2, dintre butucul rotorului (elementele *1* și *2*) și arbore;

— forța axială $P = -9896$ daN din butucul rotorului, pentru compensarea efectului axial al presiunii p_0.

Deoarece pentru elementele *3—6* temperaturile medii sînt relativ mari, constantele elastice E și μ ale materialului s-au considerat cu valorile din tabelul 7.4, după lucrarea [8], iar $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ pentru întreaga structură.

Tabelul 7.4

Valorile constantelor elastice pentru rotorul de turbină din figura 7.67

Elementul nr.	Temperatura medie t_{med} °C	Modulul de elasticitate longitudinal E daN/cm^2	Coeficientul de contracție transversală μ
3	250	$1{,}90 \cdot 10^6$	0,30
4	350	$1{,}82 \cdot 10^6$	0,30
5	480	$1{,}68 \cdot 10^6$	0,31
6	565	$1{,}60 \cdot 10^6$	0,32

```
* STRUCTURA NR. 155
  ELEMENTE
1 CIS 01
2 CIS 10
3 PLI 11
4 PLI 11
5 PLI 11
6 PLI 10
  LEGATURI
1 1,2,31
2 3E,41
3 4E,51
4 5E,6
* DATE METRIC  (CM SI DAN)
CONSTANTE 1=0,3,2=12.E-6,3=2.1E6,4=7.85E-3,12=314.1593,10=3
1 5=3.8,6=1.6,7=7,10=350,11=-9896
2 5=3.8,6=1.6,7=4,10=350,11=-9896
3 5=14,6=1.4,7=3.8,13=192.5,15=0.52,17=151.3,19=-0.091,3=1.9E6
4 5=21,6=1,7=14,13=192.5,15=0.52,17=151.3,19=-0.091,3=1.82E6
5 5=25.5,6=0.7,7=21,13=192.5,15=0.52,17=151.3,19=-0.091,3=1.68E6,1=0.31
6 5=28,6=0.5,7=25.5,13=192.5,15=0.52,17=151.3,19=-0.091,3=1.6E6,1=0.32
* REZOLVA
```

Fig. 7.69

Scanned with OKEN Scanner

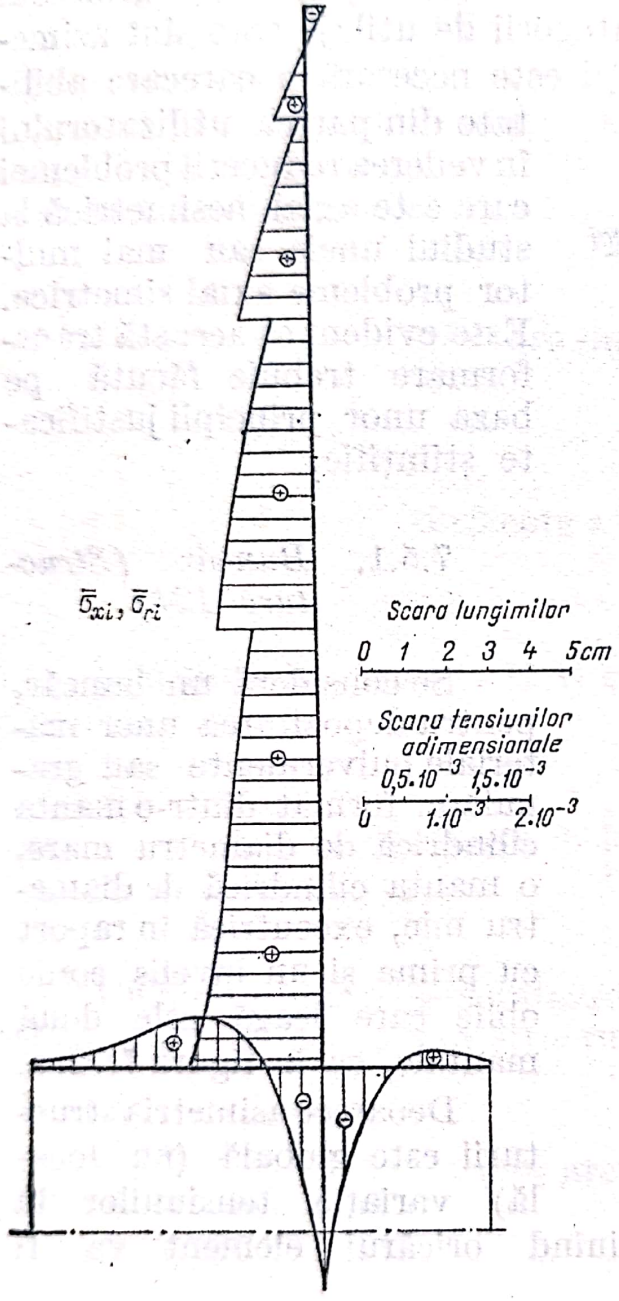


Fig. 7.70

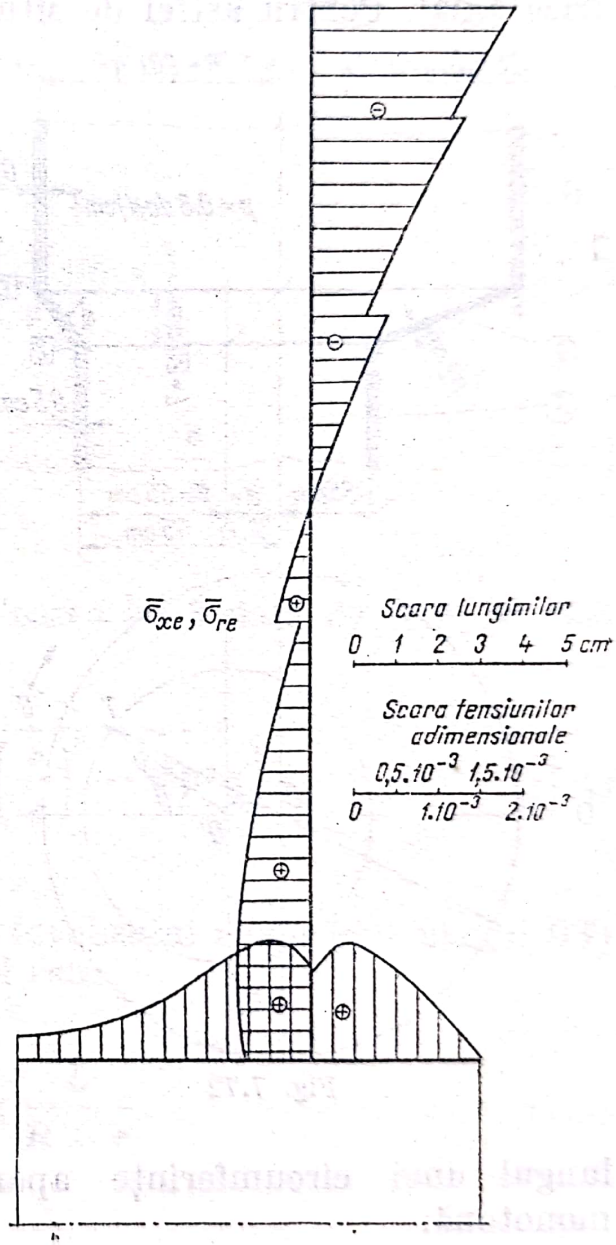


Fig. 7.71

Datele s-au introdus ca mărimi metrice, lista completă a instrucțiunilor fiind redată în figura 7.69.

Variațiile tensiunilor adimensionale axiale (radiale) și circumferențiale, calculate pe suprafața interioară, se dau în figurile 7.70 și 7.71.

Scanned with OKEN Scanner

7.5. Calculul unor utilaje axial nesimetrice

Aşa cum s-a arătat la paragraful 6.1, cu ajutorul programului STAXIS se pot calcula şi unele categorii de utilaje care sînt asimetrice axial. Pentru astfel de situaţii este necesară o oarecare abilitate din partea utilizatorului în vederea reducerii problemei care este axial nesimetrică la studiul uneia sau mai multor probleme axial simetrice. Este evident că această transformare trebuie făcută pe baza unor principii justificate ştiinţific.

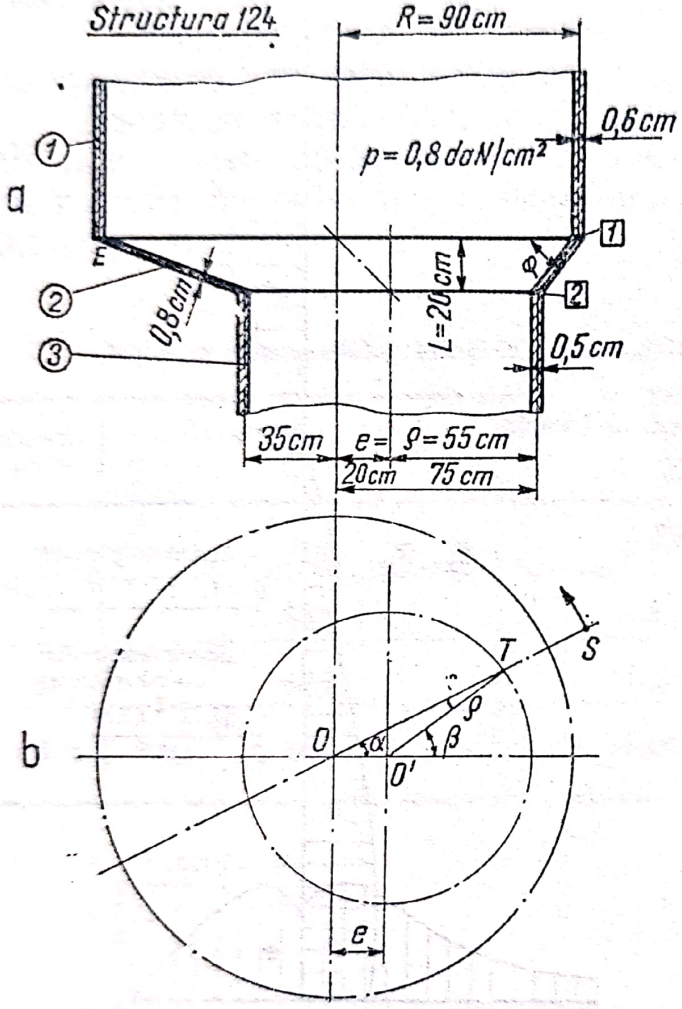


Fig. 7.72

7.5.1. *Buncăr (Structura 124)*

Se consideră un buncăr, pentru depozitarea unor materiale pulverulente sau granulare, format dintr-o manta cilindrică de diametru mare, o manta cilindrică de diametru mic, excentrică în raport cu prima şi un înveliş conic oblic care leagă cele două mantale, ca în figura 7.72, a.

Deoarece asimetria structurii este globală (nu locală) variaţia tensiunilor în lungul unei circumferinţe aparţinînd oricărui element va fi monotonă.

Se presupune că structura se secţionează cu un plan axial *OS* ca în figura 7.72, b, care trece prin axa mantalei cilindrice de diametru mare şi face unghiul α cu planul definit de axele elementelor *1* şi *3*.

Se consideră că structura reală se poate descompune într-o infinitate de structuri axial simetrice, cu lăţime infinit mică, definite în planul *OS*, avînd mantaua cilindrică mare cu raza *R* constantă,

mantaua cilindrică mică cu raza r variabilă și învelișul conic cu lungimea L constantă și unghiul φ al generatoarei variabil.

Pentru a determina funcția $r(\alpha)$ se scrie teorema sinusurilor în triunghiul OTO' din figura 7.72,b

$$\frac{r}{\sin(\pi-\beta)} = \frac{e}{\sin(\beta-\alpha)} = \frac{\rho}{\sin\alpha} \tag{7.1}$$

din care se obține

$$\beta = \arcsin\left(\frac{r}{\rho}\sin\alpha\right) \tag{7.2}$$

$$\sin\beta\,\operatorname{ctg}\alpha - \cos\beta = \frac{e}{\rho} \tag{7.3}$$

Înlocuind în expresia (7.3) valoarea lui β dată de (7.2) rezultă în final

$$r = e\left(\cos\alpha + \sqrt{\left(\frac{\rho}{e}\right)^2 - \sin^2\alpha}\right). \tag{7.4}$$

Unghiul φ dintre generatoarea învelișului conic (din planul OS) și un plan normal la axa structurii este

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{L}{R-r}. \tag{7.5}$$

Cu expresiile (7.4) și (7.5) s-au calculat valorile r și φ funcție de α, rezultatele fiind date în tabelul 7.5.

Buncărul s-a considerat solicitat cu presiunea interioară $p = 0{,}8$ daN/cm^2. Datele s-au definit ca mărimi metrice și $E=1$, $\mu = 0{,}3$. Lista instrucțiunilor pentru definirea structurii și introducerea datelor, pentru $\alpha = 0$, este reprodusă în figura 7.73.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru a ilustra modul în care variază starea de tensiune a structurii cu unghiul α, se dau în figurile 7.74 — 7.76 graficele tensiunii $\bar{\sigma}_{xi}$ pentru învelişul conic (elementul *2*) pentru $\alpha = 0°, 90°$, respectiv 180°. De asemenea s-au reprezentat grafic în figura 7.77 variaţiile tensiunilor adimensionale maxime din cele trei elemente ale structurii, funcţie de unghiul α. Se precizează că tensiunile maxime au fost $\bar{\sigma}_{xi}$ (0) pentru elementul *1*, $\bar{\sigma}_{xi}$ (20) pentru elementul *2* şi $\bar{\sigma}_{xe}$ (0) pentru elementul *3*.

```
* STRUCTURA NR. 124
  ELEMENTE
1 CIL X1
2 CON X11
3 CIL 1X
  LEGATURI
1 1,2E
2 3,2I
* DATE METRICE (CM SI DAN)
CONSTANTE 1=0.3,3=1,10=0.8
1 5=90,6=0.6
2 5=90,6=0.8,7=75,8=0.927295
3 5=75,6=0.5
* REZOLVA
```

Fig. 7.73

7.5.2. *Tanc (Structura 129)*

Tancul pentru depozitarea unor fluide, reprezentat în figura 7.78,a este format dintr-o conductă care are secţiunea de capăt oblică (elementele *1* şi *2*), un fund format dintr-o placă inelară (elementul *3*) şi un înveliş conic (elementul *4*) precum şi o manta cilindrică (elementul *5*). Solicitarea este presiunea interioară $p = 0{,}7$ daN/cm².

Tabelul 7.5

Valorile parametrilor r şi φ pentru buncărul din figura 7.72

α grade	r cm	φ radiani
0	75,0000	0,927295
30	71,4038	0,821753
60	62,2015	0,623669
90	51,2347	0,476306
120	42,2015	0,396287
150	36,7627	0,359363
180	35,0000	0,348771

Din considerente asemănătoare cu cele făcute pentru structura 124, se va considera că tancul din figura 7.78,a este secţionat cu un plan longitudinal *OS*, care face unghiul α cu planul în care panta secţiunii oblice de capăt a elementului *2* este maximă. Cu notaţiile

Scanned with OKEN Scanner

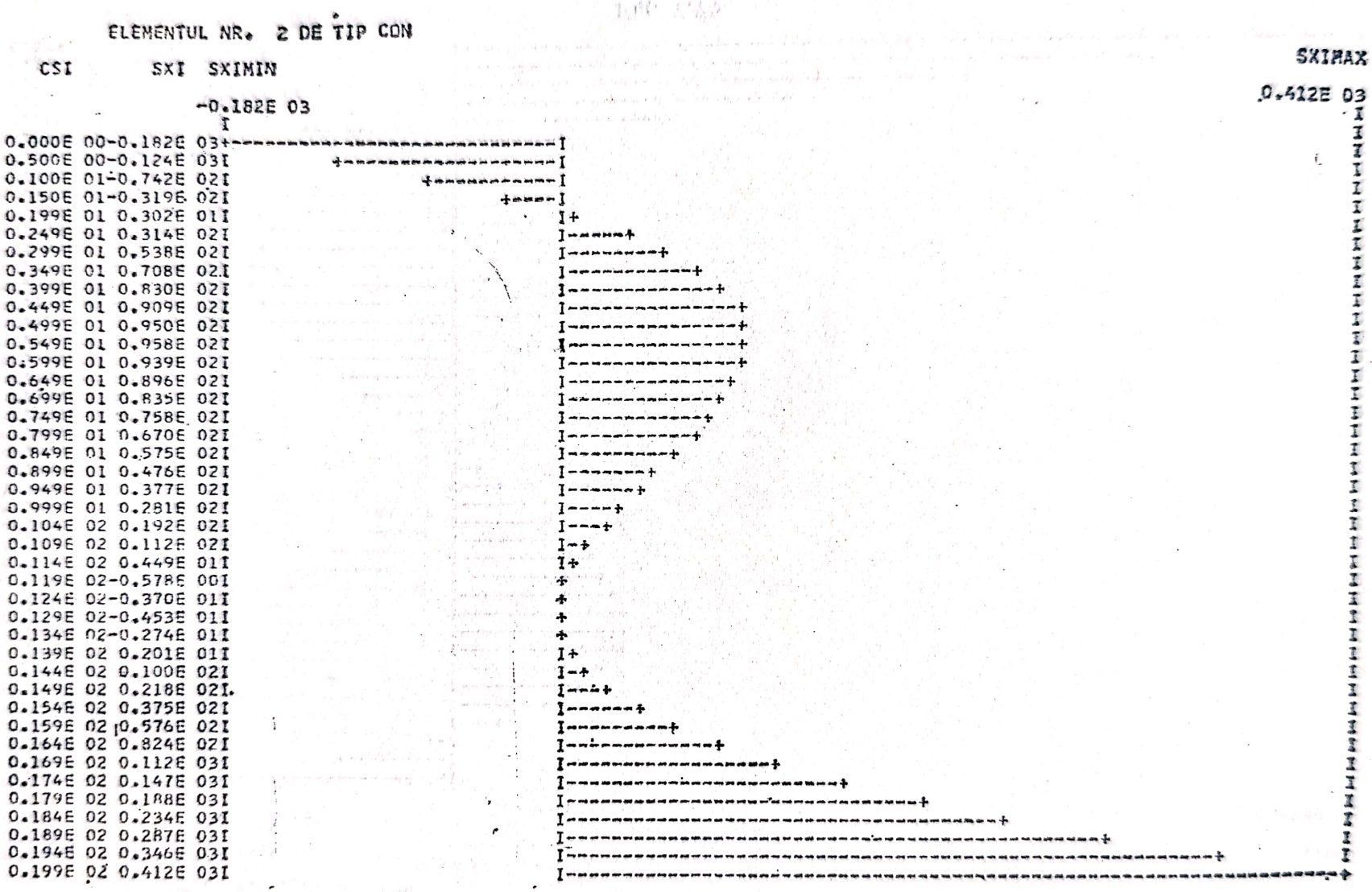

ELEMENTUL NR. 2 DE TIP CON
CSI SXI SXIMIN
-0.182E 03
SXIMAX
0.412E 03
0.000E 00-0.182E 03
0.500E 00-0.124E 03
0.100E 01-0.742E 02
0.150E 01-0.319E 02
0.199E 01 0.302E 01
0.249E 01 0.314E 02
0.299E 01 0.538E 02
0.349E 01 0.708E 02
0.399E 01 0.830E 02
0.449E 01 0.909E 02
0.499E 01 0.950E 02
0.549E 01 0.958E 02
0.599E 01 0.939E 02
0.649E 01 0.896E 02
0.699E 01 0.835E 02
0.749E 01 0.758E 02
0.799E 01 0.670E 02
0.849E 01 0.575E 02
0.899E 01 0.476E 02
0.949E 01 0.377E 02
0.999E 01 0.281E 02
0.104E 02 0.192E 02
0.109E 02 0.112E 02
0.114E 02 0.449E 01
0.119E 02-0.578E 00
0.124E 02-0.370E 01
0.129E 02-0.453E 01
0.134E 02-0.274E 01
0.139E 02 0.201E 01
0.144E 02 0.100E 02
0.149E 02 0.218E 02
0.154E 02 0.375E 02
0.159E 02 0.576E 02
0.164E 02 0.824E 02
0.169E 02 0.112E 03
0.174E 02 0.147E 03
0.179E 02 0.188E 03
0.184E 02 0.234E 03
0.189E 02 0.287E 03
0.194E 02 0.346E 03
0.199E 02 0.412E 03

Fig. 7.74

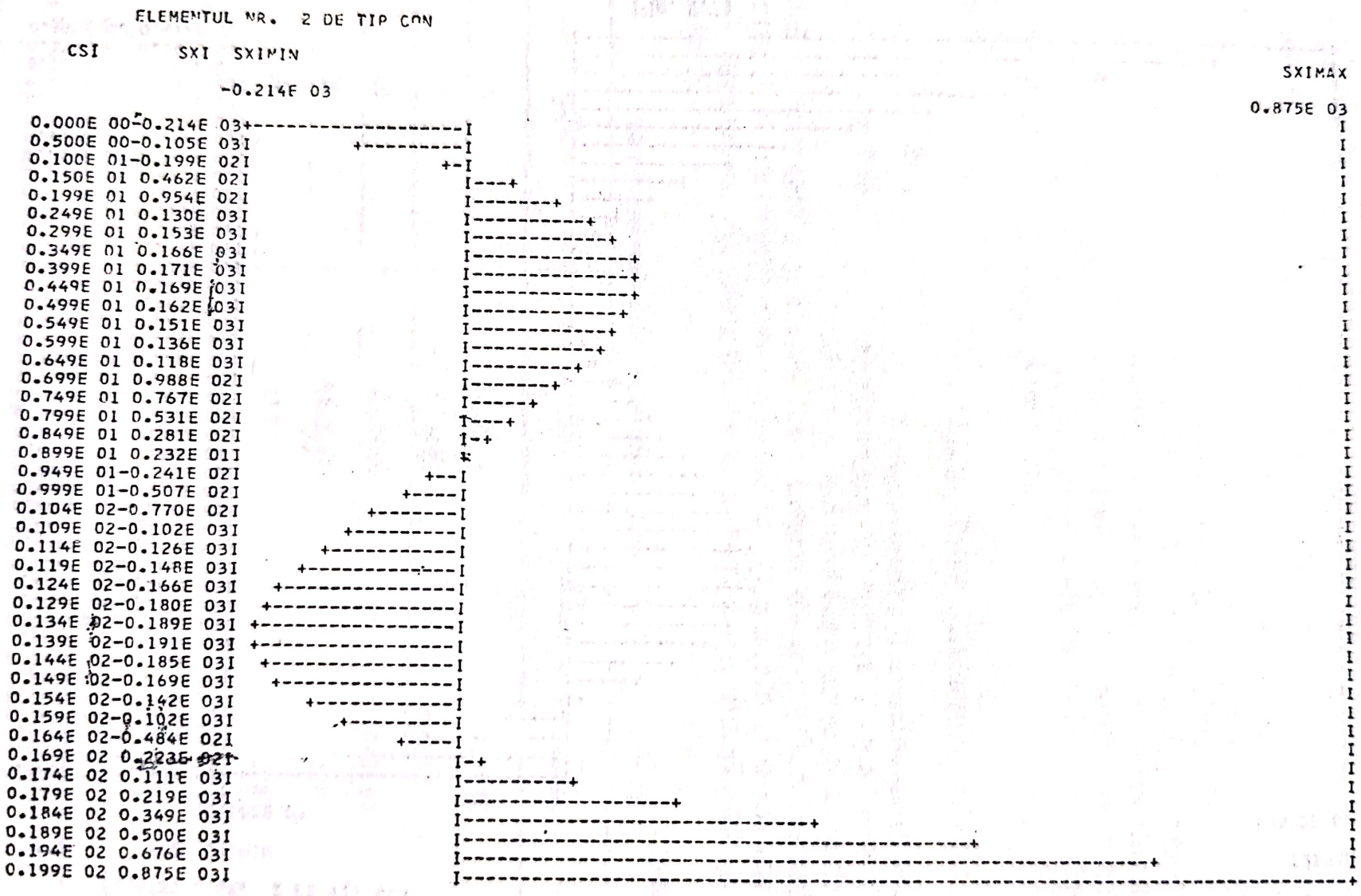

ELEMENTUL NR. 2 DE TIP CON
CSI
SXI
SXIMIN
-0.214E 03
SXIMAX
0.875E 03
0.000E 00-0.214E 03
0.500E 00-0.105E 03
0.100E 01-0.199E 02
0.150E 01 0.462E 02
0.199E 01 0.954E 02
0.249E 01 0.130E 03
0.299E 01 0.153E 03
0.349E 01 0.166E 03
0.399E 01 0.171E 03
0.449E 01 0.169E 03
0.499E 01 0.162E 03
0.549E 01 0.151E 03
0.599E 01 0.136E 03
0.649E 01 0.118E 03
0.699E 01 0.988E 02
0.749E 01 0.767E 02
0.799E 01 0.531E 02
0.849E 01 0.281E 02
0.899E 01 0.232E 01
0.949E 01-0.241E 02
0.999E 01-0.507E 02
0.104E 02-0.770E 02
0.109E 02-0.102E 03
0.114E 02-0.126E 03
0.119E 02-0.148E 03
0.124E 02-0.166E 03
0.129E 02-0.180E 03
0.134E 02-0.189E 03
0.139E 02-0.191E 03
0.144E 02-0.185E 03
0.149E 02-0.169E 03
0.154E 02-0.142E 03
0.159E 02-0.102E 03
0.164E 02-0.484E 02
0.169E 02 0.223E 02
0.174E 02 0.111E 03
0.179E 02 0.219E 03
0.184E 02 0.349E 03
0.189E 02 0.500E 03
0.194E 02 0.676E 03
0.199E 02 0.875E 03

Fig. 7.75

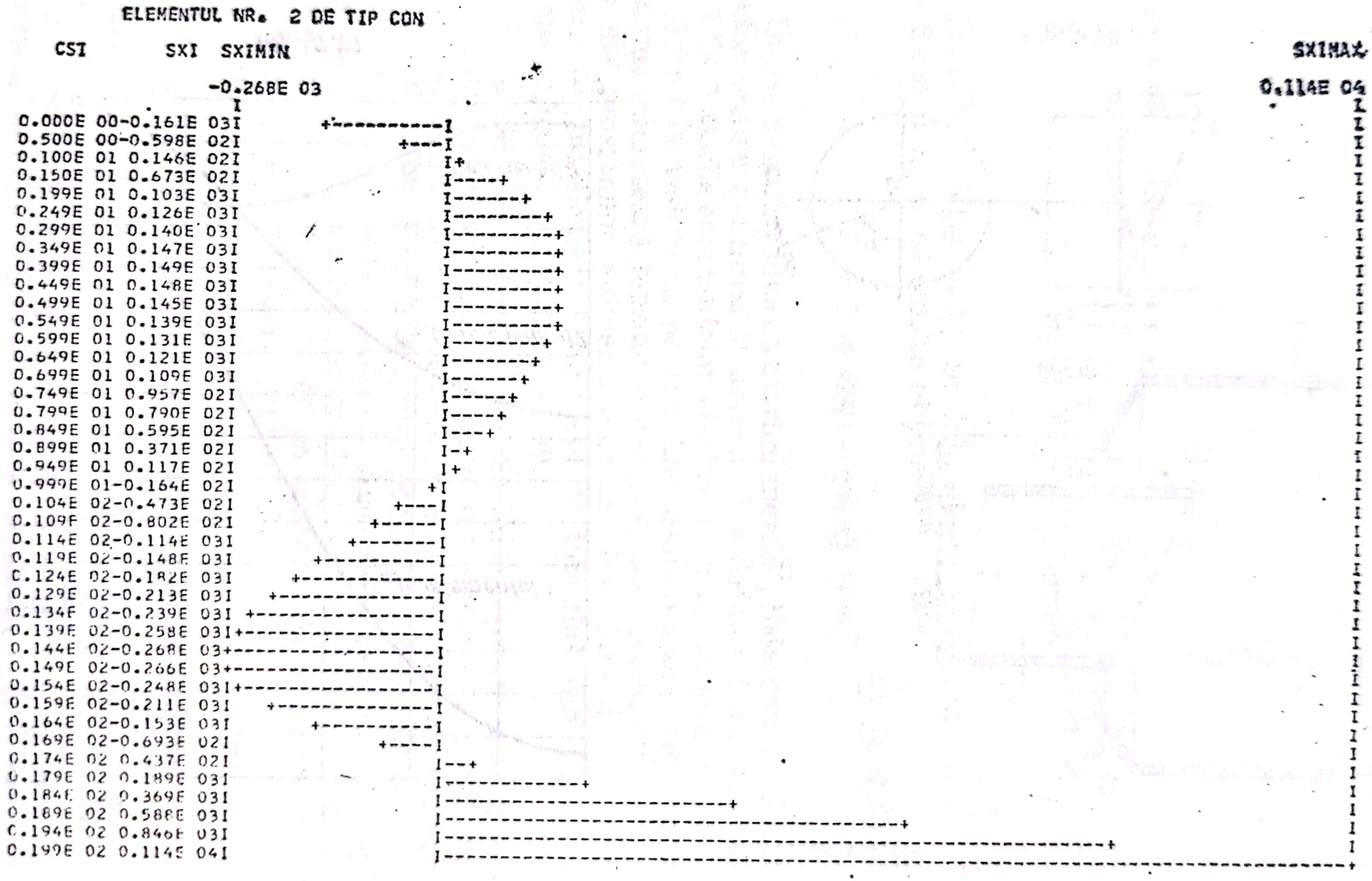

ELEMENTUL NR. 2 DE TIP CON
CSI SXI SXIMIN
-0.268E 03
SXIMAX
0.114E 04
0.000E 00-0.161E 03
0.500E 00-0.598E 02
0.100E 01 0.146E 02
0.150E 01 0.673E 02
0.199E 01 0.103E 03
0.249E 01 0.126E 03
0.299E 01 0.140E 03
0.349E 01 0.147E 03
0.399E 01 0.149E 03
0.449E 01 0.148E 03
0.499E 01 0.145E 03
0.549E 01 0.139E 03
0.599E 01 0.131E 03
0.649E 01 0.121E 03
0.699E 01 0.109E 03
0.749E 01 0.957E 02
0.799E 01 0.790E 02
0.849E 01 0.595E 02
0.899E 01 0.371E 02
0.949E 01 0.117E 02
0.999E 01-0.164E 02
0.104E 02-0.473E 02
0.109E 02-0.802E 02
0.114E 02-0.114E 03
0.119E 02-0.148E 03
0.124E 02-0.182E 03
0.129E 02-0.213E 03
0.134E 02-0.239E 03
0.139E 02-0.258E 03
0.144E 02-0.268E 03
0.149E 02-0.266E 03
0.154E 02-0.248E 03
0.159E 02-0.211E 03
0.164E 02-0.153E 03
0.169E 02-0.693E 02
0.174E 02 0.437E 02
0.179E 02 0.189E 03
0.184E 02 0.369E 03
0.189E 02 0.588E 03
0.194E 02 0.846E 03
0.199E 02 0.1145 04

Fig. 7.76

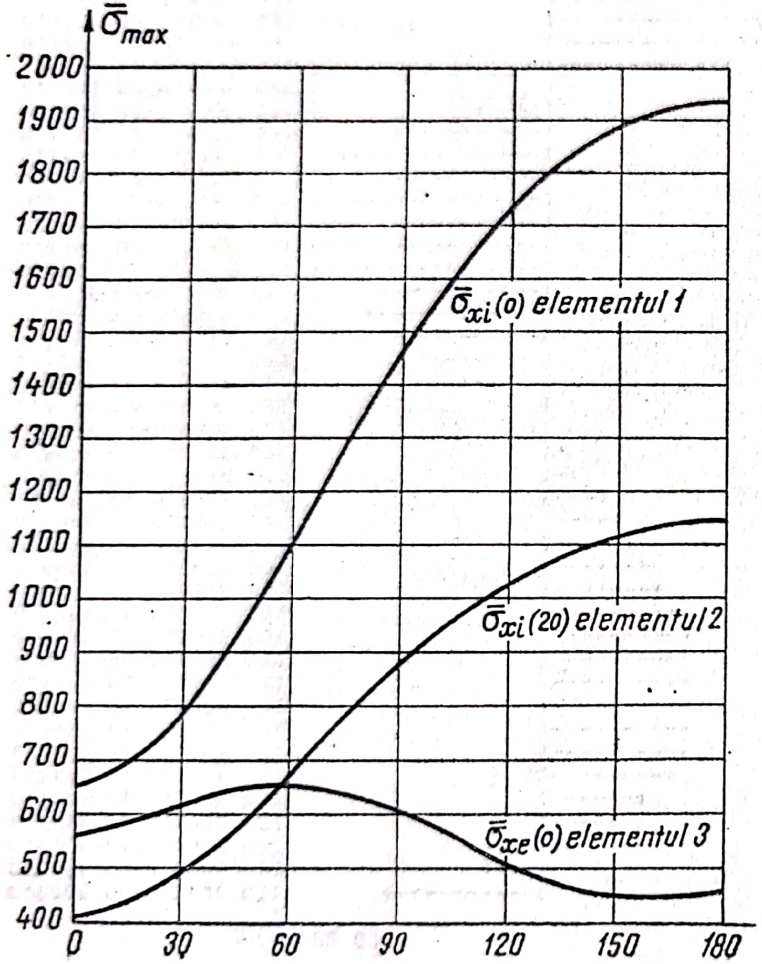


Fig. 7.77

Structura 129

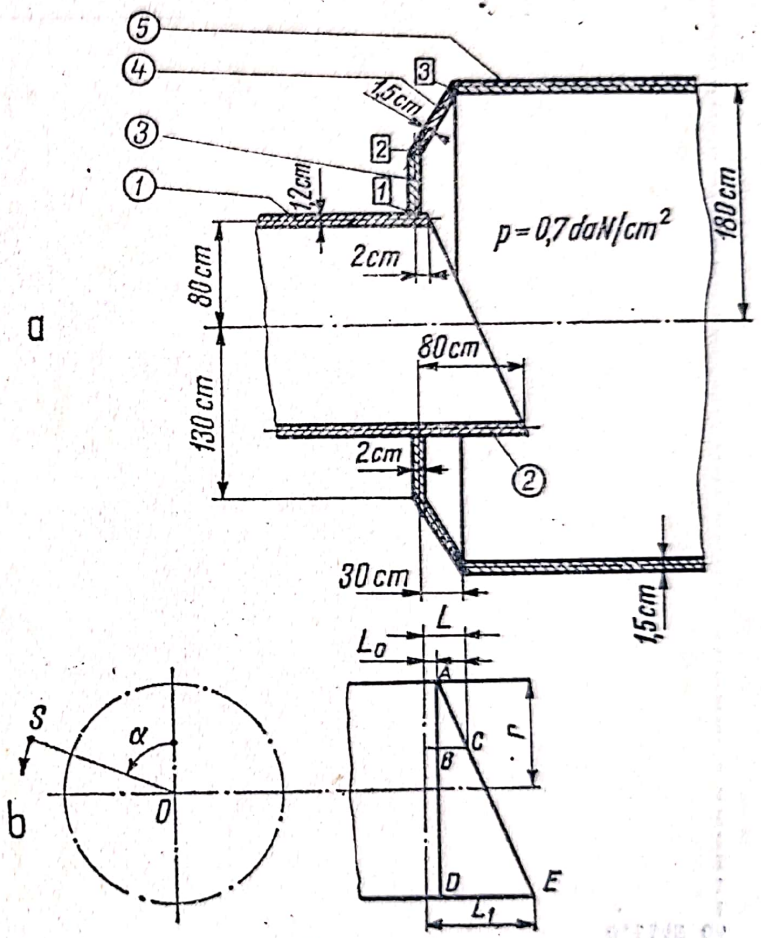


Fig. 7.78

din figura 7.78,b se poate determina lungimea L a elementului *2* în planul OS, scriind rapoartele laturilor omoloage din triunghiurile asemenea ABC şi ADE:

$$\frac{L-L_0}{L_1-L_0}=\frac{r(1-\cos\alpha)}{2r} \tag{7.6}$$

din care se obţine

$$L=L_0+\frac{L_1-L_0}{2}(1-\cos\alpha). \tag{7.7}$$

Dacă în relaţia (7.7) se înlocuieşte (conform figurii 7.78,a) $L_0=2$ cm şi $L_1=80$ cm, se obţine

$$L=2+39(1-\cos\alpha)\ \text{[cm]} \tag{7.8}$$

Datele s-au introdus ca mărimi metrice, lista completă a instrucţiunilor pentru definirea structurii şi a datelor fiind reprodusă în fig. 7.79. Valorile constantelor elastice s-au considerat $E=1$; $\mu=0{,}3$.

Avînd în vedere că pentru dimensionarea sau verificarea unei structuri interesează tensiunile maxime, s-au trasat curbele de variaţie ale tensiunilor adimensionale maxime funcţie de unghiul α, pentru fiecare element component al tancului din figura 7.78,a. Aceste curbe se dau în figura 7.80.

Se constată că pentru valori ale lui α cuprinse între 0 şi 50° au loc variaţii importante ale tensiunilor din elementele *1* şi *2*, variaţiile tensiunilor din elementele *3* şi *4* fiind relativ mici, iar cele din elementul *5* — practic nule. Pentru unghiuri peste 50° tensiunile din întreaga structură rămîn practic constante. Aceasta se explică prin faptul că pentru $\alpha\approx 50°$ elementul *2* devine lung, astfel încît condiţiile de echilibru şi cele de continuitate de pe conturul de îmbinare *1*, nu mai sînt influenţate de variaţia lungimii L.

7.6. Determinarea geometriei optime a structurilor

La proiectarea unui utilaj, care se poate schematiza pentru calculul de rezistenţă ca o structură axial simetrică formată din plăci plane şi curbe subţiri, o mare parte a parametrilor care definesc geometria, sarcinile şi materialul sînt impuse de considerente privind

Scanned with OKEN Scanner

destinaţia utilajului, condiţiile de exploatare, tehnologia de fabricaţie, posibilităţile tehnice existente, preţul de cost, condiţiile de montaj etc. În cazul unei structuri de o oarecare complexitate, mai

```
* STRUCTURA NR. 129
  ELEMENTE
1 CIL X1
2 CIS 10
3 PLI 11
4 CON 11X
5 CIL 1X
  LEGATURI
1 1,2,3I
2 3E,4I
3 5,4E
* DATE METRIC  (CM SI DAN)
CONSTANTE 1=0.3,3=1.,10=0.7
1 5=80,6=1.2
2 5=80,6=1.2,7=2,10=0.
3 5=130,6=2,7=80
4 5=180,6=1.5,7=130,8=0.540419
5 5=180,6=1.5
* REZOLVA

**AT01= 3
```

Fig. 7.79

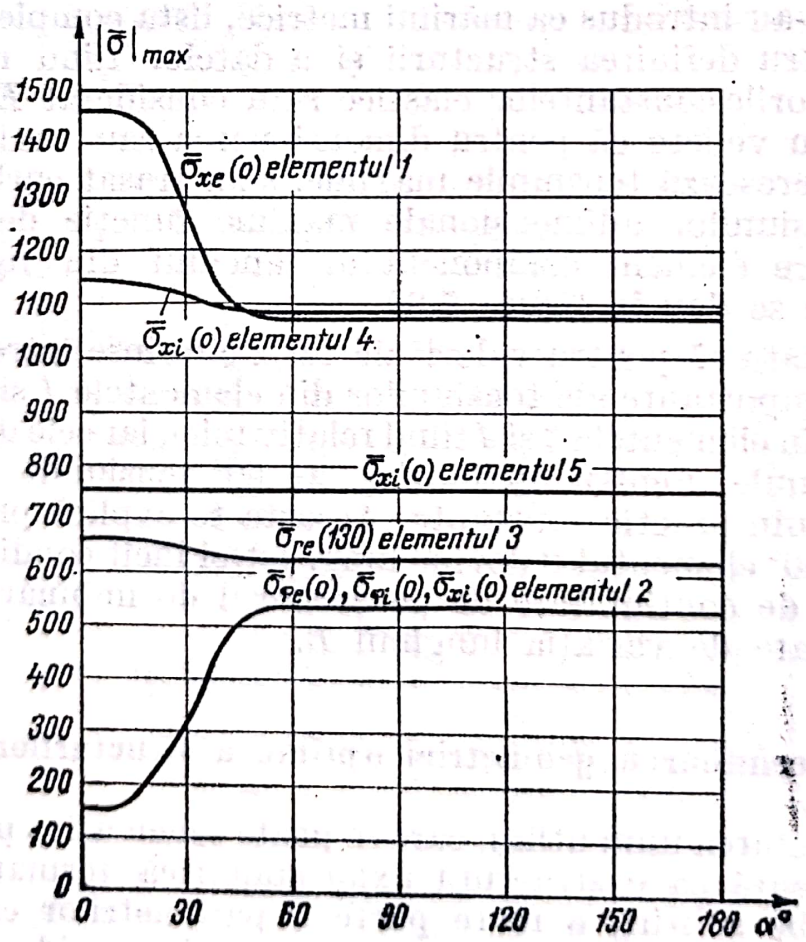


Fig. 7.80

Scanned with OKEN Scanner

rămîn însă un număr destul de mare de parametri — mai ales geometrici — care trebuie să fie determinaţi prin calcul de rezistenţă. Dacă se are în vedere că structura este static nedeterminată, calculul exact al tensiunilor nu se poate face decît dacă geometria structurii, sarcinile şi materialul sînt precizate.

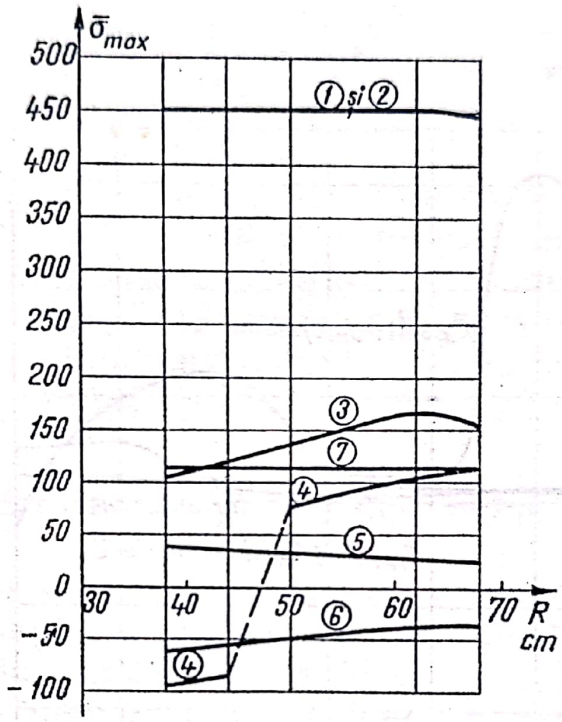


Fig. 7.81

În aceste condiţii, trebuie făcute calcule de predimensionare a structurii şi apoi, cu ajutorul programului STAXIS, se pot determina stările de tensiune dintr-un număr relativ mare de variante ale acesteia, ceea ce permite alegerea acelei variante pentru care starea de tensiune este cea mai convenabilă, ajungîndu-se astfel la o optimizare a geometriei structurii.

Criteriul pentru alegerea geometriei optime a unei structuri poate fi cel de rezistenţă, sau un altul, de natură economică, tehnologică, constructivă etc.

Se dau în continuare două exemple — relativ simple — de structuri pentru care s-a modificat un singur parametru geometric.

Pentru recipientul analizat la punctul 7.2.3 (structura 125), s-a presupus variabilă raza R a virolei cilindrice de rezemare (elementul 4), (a se vedea şi §6.1 şi fig. 6.1) pentru care s-au considerat valorile 38 ; 44 ; 50 ; 62 ; 68 cm. Din stările de tensiune obţinute, s-au extras valorile extreme ale tensiunilor pentru fiecare element, cu ajutorul

Scanned with OKEN Scanner

cărora s-au trasat curbele din figura 7.81. Pe fiecare curbă s-a scris numărul elementului pentru care a fost trasată.

Din analiza rezultatelor prezentate sintetic în figura 7.81, rezultă următoarele :

— tensiunile maxime din elementele *1* și *2* sînt practic egale, valorile lor fiind influențate relativ puțin de variația razei R ;

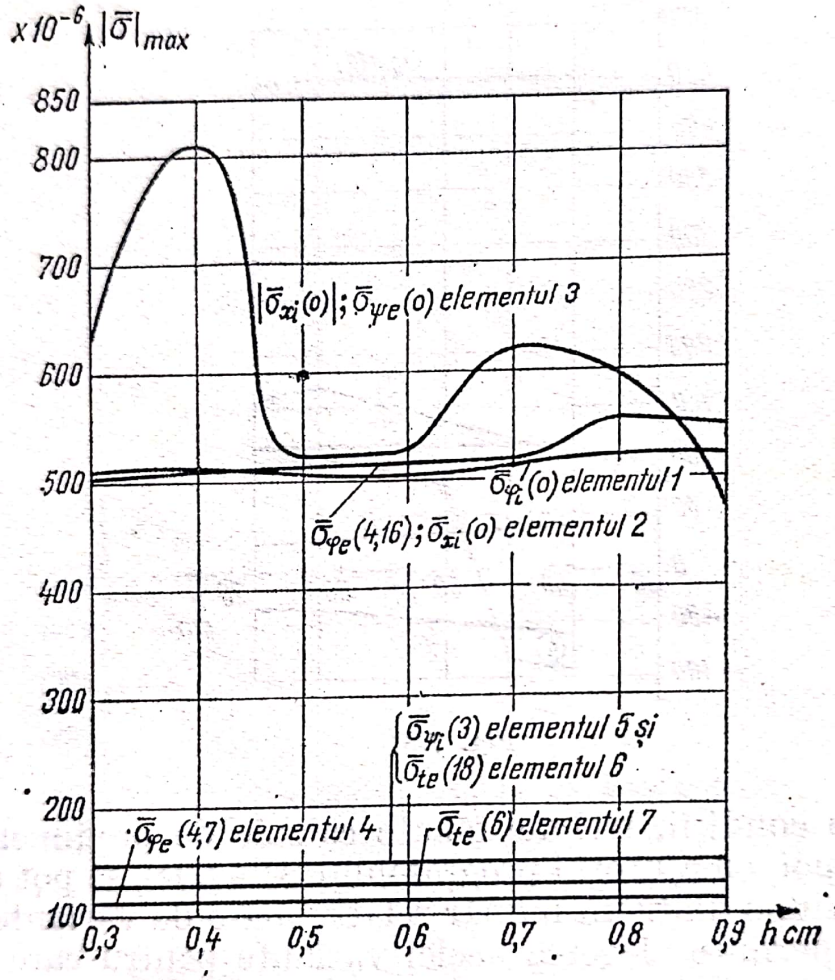


Fig. 7.82

— tensiunea maximă din elementul *3* are o valoare extremă pentru $R = 62$ cm ;

— pentru elementul *4*, tensiunea maximă (în valoare absolută) este negativă pentru $R = 38$ și 44 cm și pozitivă pentru $R \geqslant 50$ cm ;

— variațiile tensiunilor din elementele *5* și *6* sînt relativ mici, tensiunea din elementul *7* rămînînd constantă.

Pe baza acestor concluzii este posibilă, funcție de destinația concretă a recipientului, îmbunătățirea geometriei acestuia, ca de exemplu adoptarea valorii $R = 38$ cm și micșorarea grosimii elementelor *3—7*.

Scanned with OKEN Scanner

Tensiunile adimensionale s-au calculat pentru rotorul de pompă centrifugă prezentat în fig. 7.51 (structura 151, punctul 7.4.1) considerînd diverse valori ale grosimii h a elementului conic *3*. Rezultatele obținute se prezintă în figura 7.82 sub forma unor curbe care au în abscisă grosimea h, iar în ordonată tensiunea adimensională maximă în valoare absolută; curbele s-au trasat pentru fiecare element în parte.

În acest mod, fiecare curbă reprezintă înfășurătoarea familiilor de curbe ale tuturor tensiunilor unui element — în valoare absolută — calculate pentru circa 30 de abscise și pentru șirul valorilor lui h.

Se constată că variația grosimii h în intervalul 0,3—0,9 cm duce la variații de 72% ale tensiunii maxime din elementul *3* și de 9% pentru elementul *2*, în restul structurii variațiile fiind neînsemnate.

În concluzie, starea de tensiune din rotorul respectiv, privit în ansamblu, are un minimum pentru $h = 0{,}5$ cm, structura avînd în acest caz configurația optimă.

7.7. Utilizarea în proiectare a programului STAXIS

Limbajul specializat și programul STAXIS, alcătuiesc un instrument de lucru simplu și eficient pentru calculul de rezistență și proiectarea utilajelor axial simetrice, fiind accesibil oricărui proiectant sau specialist care lucrează în acest domeniu. Pentru utilizarea programului nu sînt necesare cunoștințe de programare sau de matematică.

Intrat în uzul unui atelier de proiectare, programul ar putea fi utilizat la rezolvarea următoarelor categorii de probleme:

— calculul exact al tensiunilor structurilor, ceea ce ar duce la dimensionări corecte, cu valori mai mari ale rezistențelor admisibile. În consecință structurile s-ar realiza în condițiile reducerii consumului de material, concomitent cu mărirea siguranței utilajului respectiv;

— pe baza experienței existente sau a celei cîștigate ulterior, se pot elabora pentru un utilaj un număr de variante convenabile, dintre care să se aleagă cea optimă, avînd rezultatele calculului tensiunilor;

— avînd în vedere că, de regulă, într-un atelier se proiectează o gamă de utilaje relativ restrînsă tipo-dimensional, este posibil ca prin utilizarea programului STAXIS, după o anumită perioadă de timp, să se sistematizeze rezultatele obținute pentru un număr oarecare de structuri sub forma unor tabele, nomograme, abace, diagrame etc.

Scanned with OKEN Scanner

care să simplifice calculele de predimensionare și să scurteze ciclul elaborării proiectelor ;

— știind că pentru toate structurile care au valori identice ale parametrilor adimensionali, starea de tensiuni adimensionale este aceeași, este posibilă elaborarea pe această bază, a unor norme privind calculul de rezistență și proiectarea unor clase de utilaje tehnologice mai des întîlnite.

Din cele arătate mai sus, rezultă că, folosit cu pricepere și discernămînt, programul STAXIS poate deveni un instrument eficace în calculul de rezistență al structurilor axial simetrice formate din plăci plane și curbe subțiri, un auxiliar prețios în proiectare, cu efecte economice apreciabile.

Scanned with OKEN Scanner

Bibliografie

1. ABRAMOWITZ, M., STEGUN, I.A., *Handbook of Mathematical Functions*, Dover Publications, Inc., New York, 1972.
2. AUFAURE, M., BENJAMIN, C., *Application de la méthode des éléments finis a la résolution numérique*, Revue Française de Mécanique, nr. 35, 1970.
3. BALTAC,V., ș.a., FELIX C—256, *Structura și programarea calculatorului*, Editura tehnică, București, 1974.
4. BIERGER, I.A., *Kruglie plastinki i obolociki vrașcenia*, Oboronghiz, Moskva, 1961.
5. BOIARȘINOV, S.V., *Nekotorie tehniceskie prilojenia teorii osesimmetricinoi deformații tonkostennoi țilindriceskoi obolociki*, Rasceti na procinosti, nr. 6, 1960.
6. BUIZ, C., *Pressure Vessel Design and Analysis*, Mac Millan, London, 1967.
7. BURTON, P., *The Shifting Roles of Computers, Experiments and Analysis in Applied Mechanics*, Experimental Mechanics, vol. 11, nr. 9, 1971.
8. BUZDUGAN, GH., *Rezistența materialelor*, Editura tehnică, București, 1974.
9. BUZDUGAN, GH., ș.a., *Culegere de probleme din rezistența materialelor*, Editura didactică și pedagogică, București, 1974.
10. CASACCI, S., BOSC, J., *Calcul de la flexion des coques coniques d'épaisseur constante soumises a des charges axisymétriques*, Dunod, Paris, 1959.
11. CASACCI, S., PICOLLIER, G., *Étude de la flexion des coques coniques d'épaisseur variable soumises à des efforts centrifuges*, La Houille Blanche, vol. 16., nr. 1, 1961.
12. CASACCI, S., PICOLLIER, G., *Étude de la flexion des coques toriques d'épaisseur constante chargé axisymetriquement*, La Houille Blanche, vol. 17, nr. 1, 1972.
13. CONSTANTINESCU, I., *Stări de eforturi unitare în recipientele cilindrice cu fund plan, solicitate cu presiune interioară* (teză de doctorat), Institutul Politehnic București, 1972.
14. CONSTANTINESCU, I., *Starea de eforturi unitare într-un recipient cilindric cu fund plan și o porțiune de manta în consolă*, Bul. Inst. Polit. Buc., vol. 34, nr. 1, 1972.
15. CONSTANTINESCU, I., *Stări de tensiune în recipientele cu două mantale cilindrice concentrice și fund plan, solicitate cu presiune interioară*, St. cerc. mec. apl., vol. 32, nr. 6, 1973.
16. CONSTANTINESCU, I., *Corelații între tensiuni și parametri geometrici ai unui recipient cu două mantale cilindrice și fund plan, solicitat cu presiune interioară*, Bul. Inst. Polit. Buc., vol. 36, nr. 2, 1974.
17. CONSTANTINESCU, I., *Analiza stărilor de eforturi unitare dintr-o clasă de structuri axial-simetrice de tip recipient*, Bul. Univ. Brașov, Seria A/I mecanică aplicată, vol. 16, 1974.
18. CONSTANTINESCU, I., *Calculul tensiunilor în structuri axial-simetrice aflate în mișcare de rotație*, St. cerc. mec. apl,. vol. 34, nr. 1, 1975.
19. CONSTANTINESCU, I., TACU, T., *Algoritm și limbaj pentru calculul tensiunilor în structuri izotrope, axial simetrice*, St. cerc. mec. apl., vol. 36, nr. 2, 1977.
20. CRUȚU, G., LUPȘA, C., *Programarea la calculatorul FELIX C — 256*, FORTRAN-COBOL, Editura științifică, București, 1973.
21. DANCEA, I., *Programarea calculatoarelor numerice pentru rezolvarea problemelor cu caracter tehnic și de cercetare științifică*, Editura Dacia, Cluj, 1973.
22. DEMIDOVICH, B. P., MARON., I.A., *Computational Mathematics*, Mir Publishers, Moscow, 1976.
23. DORN., W.S., McCRACKEN, D.D. *Metode numerice cu programe în FORTRAN IV* Editura tehnică, București, 1976.
24. EBERLE, E., *Tensions dans les enveloppes cylindriques de longueur fine*, Revue technique Sulzer, nr. 1, 1959.
25. ENDERBY, L.R., WHITE, D. J., *Axi-Symmetric Method for Determining Thermal Stresses in Pistons*, Journal of Strain Analysis, vol. 3, nr. 2, 1968.

Scanned with OKEN Scanner

00017571

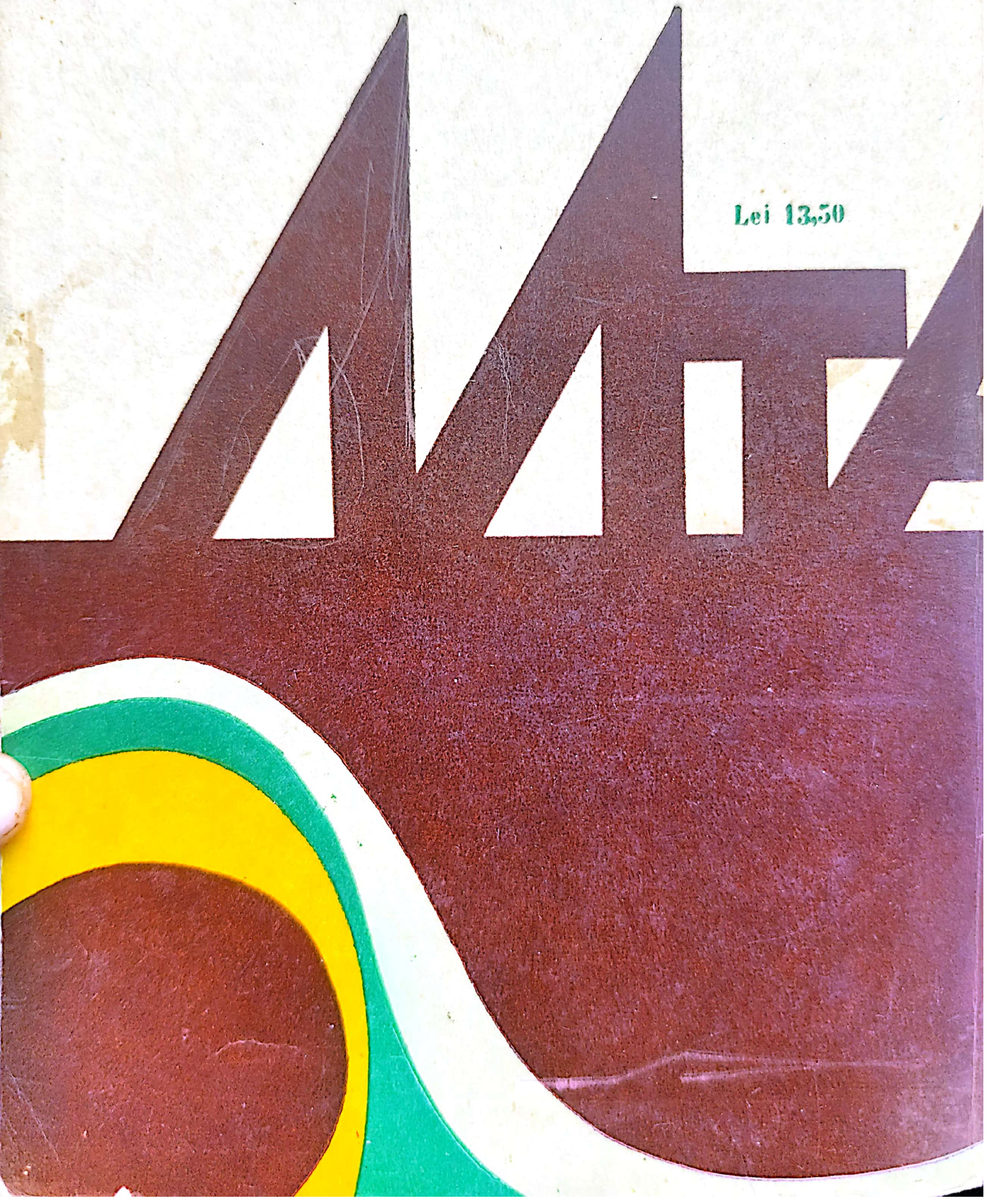
26. FÉODOSSIEV, V., *Résistance des matériaux*, Éditions Mir, Moscou, 1971.
27. FLÜGGE, W., *Statique et dynamique des coques*, Eyrolles, Paris, 1960.
28. FLÜGGE W., *Stresses in Shells*, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1960.
29. GATEWOOD, B.E., *Thermal Stress*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1957.
30. GERIJ, J., *Calcul numérique des coques minces dans le problème axisymétrique*, Revue Française de Mécanique, nr. 17, 1966.
31. HALLAM, C.B., OLLERTON. E., *Thermal Stresses in Axially Connected Circular Cylinders*, Journal of Strain Analysis, vol. 8, nr. 3, 1973.
32. JOHNS, D.J., *Thermal Stress Analyses*, Pergamon Press, Oxford-London-Edinburgh, 1965.
33. KOVALENKO, A. D., *Plastini i obolociki v rotorah turbomaşin*, Dokladi A.N., Kiev, 1955.
34. KRAUS, H., *Thin Elastic Shells*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967.
35. LEIRIS, H., ROBERT, A., VENON, M., *Calcul des contraintes dans les enveloppes de revolution chargées axisymetriquement*, Colloque international RILEM, Bucureşti, 1969.
36. LENGER, F., *Modern Blast Furnace Design in Germany*, Proceedings of the C.C. Furnas Memorial Conference on Ironmaking Technology, Buffalo, 19—20 oct., 1970.
37. MASSONNET, CH., ş.a., *Calculul structurilor la calculatoare electronice*, Editura tehnică, Bucureşti, 1974.
38. NOVOZHILOV, V.V., *Thin Shell Theory*, Wolters-Noordhoff Publishing, Groningen, 1970.
39. OSIPOVA, L.N., TUMARKIN, S.A., *Tables of the Computation of Torroidal Shells*, Publishing Noordhoff Ltd., Groningen, 1965.
40. PONOMARIOV, S.D., ş.a., *Calculul de rezistenţă în construcţia de maşini*, vol. 2 Editura tehnică, Bucureşti, 1963.
41. POPA, B., THEIL, H., MĂDĂRĂŞAN, T., *Schimbătoare de căldură industriale*, Editura tehnică, Bucureşti, 1977.
42. PREATER, R. W. T., *Stresses in Compact End Closures for Cylindrical Pressure Vessels*, Journal of Strain Analysis, vol. 4., nr. 1, 1969.
43. RENERT, M., *Calculul şi construcţia utilajului chimic*, vol. 1 şi 2, Editura didactică şi pedagogică, Bucureşti, 1971.
44. SCHWAIGERER, S., *Festigkeitsberechnung von Bauelementen des Dampfkessel — Behälter — und Rohrleitungsbaues*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1970.
45. THEOCARIS, P.S., ş.a., *Analiza experimentală a tensiunilor*, vol. 1 şi 2, Editura tehnică, Bucureşti, 1976, 1977.
46. TIMOSHENKO, S., WOINOWSKY-KRIEGER, S., *Teoria plăcilor plane şi curbe*, Editura tehnică, Bucureşti, 1968.
47. WANG, P.C., *Metode numerice şi matriceale în mecanica construcţiilor*, Editura tehnică, Bucureşti, 1970.
48. WIEDERKEHR, R., GIRARDIER, J. P., *Calcul des pièces coniques et tronconiques*, Bulletin Escher Wyss, vol. 38, nr. 2, 1965.
49. WITTRICK, W. H., *Edge Stresses in Thin Shells of Revolution*, Australian Journal of Applied Science, vol. 8, nr. 4, 1957.
50. ZIENKIEWICZ, O.C., CHEUNG. Y, K., *The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics*, McGraw-Hill Publishing Co., London-New York, 1970.
51. * * * *Cazane de abur şi recipiente sub presiune* — Îndrumător, Editura tehnică, Bucureşti, 1964.
52. * * * *Prescripţii tehnice pentru proiectarea, execuţia, instalarea, exploatarea, repararea şi verificarea recipientelor metalice stabile sub presiune* (C4—73), Editura tehnică, Bucureşti, 1974.

Scanned with OKEN Scanner

302

Editura tehnică

Lei 13,50



Scanned with OKEN Scanner